INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Noviembre 2022 · nº 554 · 6,50 €
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INFORME ESPECIAL

AGUJEROS NEGROS MENOS OSCUROS

Nuevos avances arrojan luz sobre los objetos más enigmáticos del cosmos

AGRICULTURA

Los estragos del acaparamiento de tierras

CONSERVACIÓN

Ciencia ciudadana para salvar las serpientes

BIOLOGÍA

Nueva hipótesis sobre el origen de la vida

SUMARIO

ARTÍCULOS

SECCIONES

ILUSTRACIÓN DE PORTADA: OLENA SHMAHALO



Erupción del volcán Fagradalsfjall en 2022. Se distinguen varios observadores acercándose a la lava.

GEOLOGÍA

DESPERTAR VOLCÁNICO

Las súbitas erupciones en Islandia parecen marcar el final de una tregua de 800 años

Tras más de siete meses de calma volcánica, este pasado verano la península de Reykjanes, en el oeste de Islandia, volvió a estallar en llamas. Después de que una serie de terremotos sacudiera la zona a finales de julio y principios de agosto, el volcán Fagradalsfjall escupió un torrente de lava en el valle de Meradalir (cerca de la lava expulsada por el mismo volcán en 2021, que apenas se había enfriado), ofreciendo a los turistas e investigadores el vibrante resplandor rojo anaranjado de la roca fundida a solo treinta kilómetros de Reikiavik.

Estas impresionantes exhibiciones volcánicas no son raras en Islandia, una de las masas continentales más jóvenes del mundo en términos geológicos. El país entero es el producto de millones de años de erupciones y se halla situado en un punto que favorece la actividad volcánica actual; los científicos advierten que la reciente sucesión de erupciones podría señalar el despertar de un potente sistema volcánico después de un letargo de 800 años.

La erupción de este verano brindó una valiosa oportunidad para recabar datos sobre el desarrollo del sistema y el movimiento subterráneo del magma. Las mediciones efectuadas en este escenario tan accesible ayudarán a predecir mejor el inicio y la causa de las erupciones volcánicas, afirma la geofísica Sigrun Hreinsdóttir: «En Islandia no abunda la vegetación [que obstaculice la vista], por lo que estamos obteniendo una profusión de imágenes vía satélite que nos ayudan a entender lo que ocurre realmente. El panorama completo resulta bastante sorprendente para uno de estos eventos».

Islandia se asienta a caballo entre dos placas tectónicas, enormes fragmentos de la corteza terrestre que encajan como las piezas de un rompecabezas para formar la cubierta rocosa exterior de nuestro planeta. Las placas norteamericana y euroasiática se separan a un ritmo de entre dos y cinco centímetros al año, lo cual abre gradualmente, como si fuera una cremallera, el fondo del océano Atlántico para crear una cadena de volcanes submarinos conocida como dorsal mediooceánica. Conforme las placas se separan, emergen nuevos materiales del manto terrestre: una capa de roca caliente y viscosa comprendida entre la corteza y el núcleo metálico del planeta.

Este material se funde parcialmente al ascender, suministrando magma a los volcanes de Islandia. Sin embargo, no constituye la única fuente de roca fundida de la región. Islandia, al igual que Hawái, se asienta sobre un «punto caliente», una columna de roca caliente que se eleva a través del manto, impulsada por su propia flotabilidad. Ello añade más combustible a los estallidos volcánicos de Islandia.

En la isla, esta combinación de fuentes de magma se manifiesta en diversos tipos de volcanes. El cono imponente del Hekla, en el sur, se halla más cerca del punto caliente del manto, mientras que las cadenas de pequeños cráteres y fisuras que están formándose ahora en el sistema volcánico de Reykjanes coinciden con el límite de la placa tectónica, que se extiende desde la costa tierra adentro.

«Las erupciones volcánicas que tienen lugar en esta región [Reykjanes] no se originan en la típica montaña en forma de cono, sino más bien a través de aberturas en la corteza», explica Sara Barsotti, coordinadora de riesgos volcánicos de la Oficina Meteorológica de Islandia (OMI).

Estas aberturas se producen porque la región se encuentra situada a lo largo de un pliegue de la dorsal oceánica; las grietas se forman como resultado de que las dos placas se desplazan en un ángulo extraño. Algunas de ellas se llenan de magma, el cual puede llegar a entrar en erupción; otras propician que los trozos de corteza se deslicen unos sobre otros y dan lugar a terremotos. El magma que se mueve a través de la corteza también puede causar actividad sísmica cuando las grietas se forman o se ensanchan para alojar la roca fundida.

Mientras la dorsal mediooceánica se expande a lo largo de los milenios, Reykjanes atraviesa períodos de calma que suelen durar entre 800 y 1000 años, seguidos de dos o tres siglos de erupciones espectaculares, etapa que los científicos

sospechan que está iniciándose ahora. En la década de 1990, Hreinsdóttir (ahora en la empresa neozelandesa de consultoría e investigación geocientífica GNS Science, Te Pū Ao) instaló una red de estaciones de GPS en toda la península para monitorizar las lentas transformaciones del terreno, que ocurrían acompañadas de pequeños terremotos. En aquel momento no había erupciones activas. Sin embargo, en retrospectiva, estas mediciones quizá captaran «la primera señal de que Reykjanes estaba a punto de cobrar vida», según Hreinsdóttir.

Ahora parece claro que la península está despertando. Desde finales de la década de 2000, el magma que se acumula bajo la superficie ha provocado que toda la región se infle y desinfle periódicamente, abultándose para adaptarse a los movimientos de la roca fundida en el subsuelo. Barsotti y sus colegas de la OMI rastrean la ubicación de estos abultamientos, información que combinan con los datos procedentes de sensores sísmicos, GPS e imágenes vía satélite para tratar de predecir qué partes de Reykjanes pueden sufrir futuras erupciones. Justo antes de que se abrieran las primeras fisuras en 2021, la última señal de alarma la dio una serie de intensos terremotos que sacudieron el oeste de Islandia.

Hreinsdóttir había anhelado presenciar una erupción desde que emprendió el trabajo de campo en la península hace unos treinta años, pero solo pudo ver su sueño hacerse realidad desde la distancia en 2021, cuando la pandemia de COVID la obligó a permanecer en su casa de Nueva Zelanda. El pasado mes de agosto acudió en peregrinación para tocar con sus propias manos la lava enfriada del año pasado, y un terremoto de magnitud 4,5 los zarandeó a ella y a su hijo de seis años.

El temblor, ocurrido el 2 de agosto, constituyó un aviso de la erupción que se produciría al día siguiente, la cual resultó ser aún mayor y más espectacular que la que ella se había perdido, aunque de menor duración. «Tuve una sensación muy agradable», comenta. «Era como si el Fagradalsfjall estuviera diciéndome “¡Hola!”.»

El día de la erupción, Hreinsdóttir se dirigió a Meradalir junto con sus colegas de la Universidad de Islandia, donde trabajaba antes, y unos 1800 visitantes más. Todos contemplaron el resplandor naranja fluorescente de la lava que manaba de entre las rocas de la zona que ella había estudiado.

La región permaneció activa durante semanas y Hreinsdóttir confía en obtener nuevos datos sobre la geoquímica y la velocidad de ascenso del magma, así como sobre el efecto de la erupción en los sistemas volcánicos vecinos. Ahora que Reykjanes parece haber despertado de su letargo de ocho siglos, es posible que las erupciones ocurran cada pocos años, lo que proporcionará más indicios sobre el funcionamiento interno del sistema.

«Ojalá lograra vivir doscientos o trescientos años para poder observarlo durante un tiempo», bromea Hreinsdóttir.

Sasha Warren



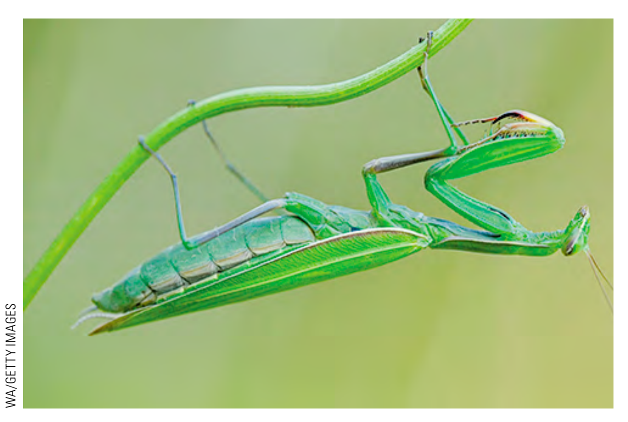
Erupción del volcán Fagradalsfjall en 2021.

JEROEN VAN NIEUWENHOVE

COMPORTAMIENTO ANIMAL

¿QUÉ CONVIERTE EN CANÍBAL A UN ANIMAL?

La creciente densidad de población suele ser el desencadenante principal



WA/GETTY IMAGES

Las hembras de mantis religiosa devoran a sus parejas.

Desde las amebas que se fagocitan unas a otras hasta los osos polares que devoran oseznos, el canibalismo está extendido por todo el reino animal, aunque sea una práctica no exenta de riesgos. Los animales pertenecientes a la misma especie suelen poseer defensas parecidas y el contagio de enfermedades es fácil y, por si eso fuera poco, devorar a tu prole va en detrimento de tu éxito genético. Entonces, ¿qué empuja a algunos a traspasar ese límite?

«Casi todos los depredadores optan por el canibalismo cuando las condiciones devienen funestas», asegura Jay Rosenheim, entomólogo de la Universidad de California en Davis. Hasta algunos herbívoros famélicos acaban entregándose a él, añade. Después de ver en algodonales de California a chinches insectívoras del género *Geocoris* comenzar a engullir sus propios huevos, pese a la multitud de presas a su alcance, Rosenheim decidió investigar qué impulsa a los animales a convertirse en caníbales.

«La densidad demográfica suele ser el desencadenante», señala. En un estudio publicado en *Ecology*, su equipo condensó más de tres decenios de investigaciones en un modelo matemático que vincula la densidad con el canibalismo.

«Parece absurdo, pero en muchísimos modelos no se había tenido en cuenta la dependencia de la densidad», afirma Chloe Fouilloux, investigadora en la Universidad de Jyväskylä en Finlandia y estudiosa de las ranas caníbales, ajena al estudio. Aunque otros modelos contemplan la densidad como un elemento secundario, este se centra principalmente en las variables vinculadas con la densidad, como la frecuencia con que un animal se encuentra con otro y la probabilidad de que esos encuentros acaben en agresión.

Los autores también clasificaron los distintos modos en que la densidad demográfica deriva en canibalismo. No es de extrañar que la escasez de recursos sea un factor esencial: «El hambre probablemente sea lo más cercano a un detonante universal», señala Rosenheim. El estudio pone de relieve las investigaciones que indican que el hambre activa ciertas neurohormonas que fomentan la agresividad y, posiblemente, el comportamiento caníbal.

La propagación de enfermedades, impulsada por la densificación de las poblaciones, también contribuiría a los hábitos caníbales. A un animal enfermo le puede atenazar el hambre lo suficiente como para comerse su piel. O uno sano puede devorar a sus vecinos enfermos y debilitados.

«Las interrelaciones entre la densidad, la enfermedad y el canibalismo son muy, pero que muy complicadas», advierte Rosenheim, y añade que este campo de investigación está en un momento propicio para los descubrimientos.

En algunas especies, la llegada de un gran número de congéneres puede desatar el canibalismo aunque abunde el alimento. Así sucede con las chinches hembras de *Geocoris*: en condiciones de superpoblación, comienzan a comportarse como si su puesta pudiera ser la de otra hembra. Al basar su modelo en condiciones biológicas reales, como la escasez de alimento, el riesgo de enfermedades y las posibilidades crecientes de un encuentro, los autores han demostrado que la densidad es «ese factor regulador sorprendente que ayuda a explicar y a contextualizar el papel del canibalismo en la estabilización de la dinámica poblacional», concluye Fouilloux.

Fionna M. D. Samuels

CIENCIA DE LOS MATERIALES

MICROCÁPSULAS A BASE DE SEDA

Un material de la naturaleza podría reducir el uso de ciertos microplásticos

Han transcurrido milenios desde que los humanos descubrieron la seda y empezaron a recolectarla de los capullos de los gusanos de seda, pero los científicos continúan buscando nuevas aplicaciones para este extraordinario material. Ahora las investigaciones apuntan a que podría ayudar a abordar un problema ambiental y sanitario cada vez mayor: los microplásticos, que se han hallado en todas partes, desde las cimas de las montañas hasta los fondos marinos y el torrente sanguíneo humano.

La mayoría de los microplásticos proceden de la degradación de objetos de mayor tamaño. Pero una pequeña parte de estas partículas contaminantes se añaden deliberadamente a ciertos productos, según un informe de la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas. Entre ellas se incluyen microcápsulas que protegen y liberan de forma gradual los principios activos de productos como cosméticos y aerosoles agrícolas.

Según un artículo publicado en *Small*, investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y la empresa química BASF han desarrollado una alternativa biodegradable a estas cápsulas, basada en la seda. Este tipo de estudios se necesitan con urgencia, pues las compañías se enfrentan a normas cada vez más estrictas sobre el uso de microplásticos.

Hallar materiales sustitutivos es «la única forma de controlar» la contaminación por microplásticos, aparte de reducir los residuos plásticos generados por una mala gestión, comenta Denise Mitrano, química ambiental de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, ajena al estudio.

La seda no es tóxica, resiste el procesamiento y puede obtenerse a partir de las fibras de baja calidad desechadas por la industria textil, explica Benedetto Marelli, ingeniero del MIT y coautor del estudio. Ya se han propuesto otros compuestos naturales para sustituir los microplásticos añadidos, pero «no cumplen todos los requisitos, como sí ocurre con la seda», señala Marelli.

Los investigadores adaptaron instalaciones de producción existentes para crear microcápsulas a base de la proteína de la seda fibroína;



SALAITHIP CHAIMONGKOL/EYEEM/GETTY IMAGES

estas contenían formas sólidas concentradas de un herbicida y un componente habitual de los productos dermatológicos, la vitamina C. El coautor del estudio Muchun Liu, también del MIT, sumergió las microcápsulas en etanol durante distintos períodos de tiempo para controlar la forma en que las largas cadenas de proteínas de la seda se pliegan y se adhieren entre sí. Las microcápsulas quedan así «ajustadas» para que se disuelvan y liberen los principios activos a la velocidad deseada.

Para competir comercialmente, las microcápsulas de seda deben «presentar la misma eficacia, si no mayor, que las no biodegradables», explica Marelli. Algunos herbicidas se liberan con lentitud para eliminar las malas hierbas sin perjudicar los cultivos alimentarios. Cuando se probaron las microcápsulas a base de seda en plantas de maíz, se observó que causaban menos daños que los productos comerciales existentes.

Sustituir las microcápsulas no biodegradables por las de seda podría no ser siempre la solución, pero parece una opción prometedora en comparación con otras investigadas por BASF, afirma el coautor Pierre-Eric Millard, científico de la compañía. Los productos con microcápsulas a base de seda podrían estar disponibles en pocos años si BASF los implanta, añade.

Los investigadores intentarán pronto encapsular principios activos que requieran procesos de fabricación diferentes, como los que deben permanecer en estado líquido o gaseoso.

Ysabelle Kempe

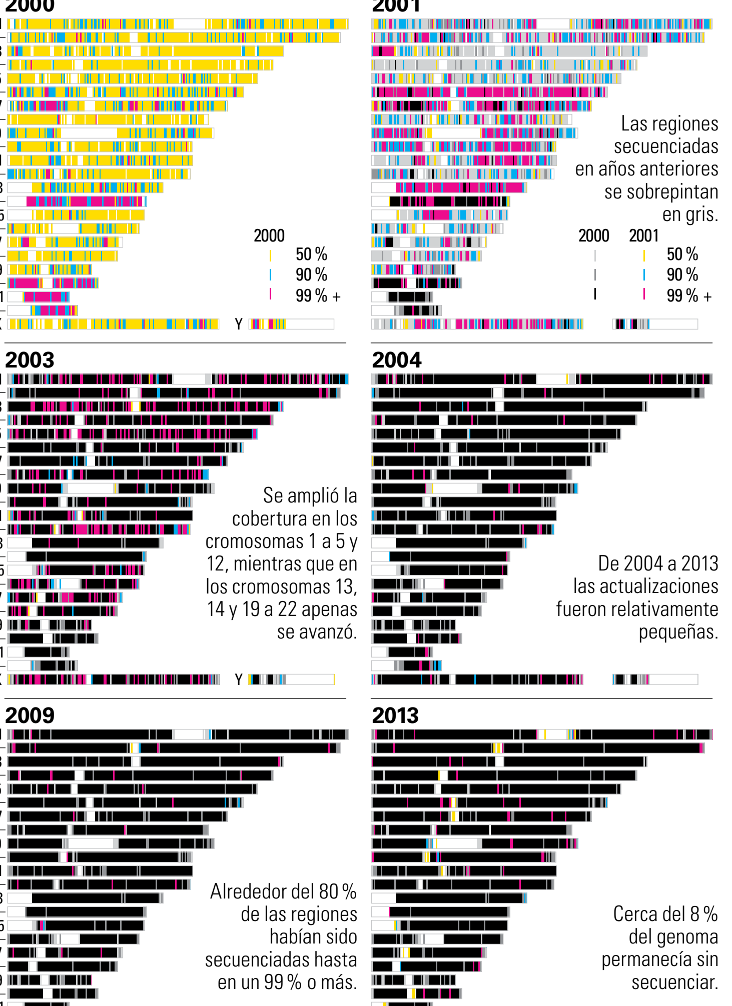
GENÉTICA

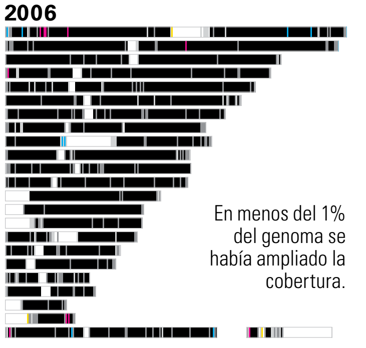
3.117.275.501 BASES, CERO HUECOS

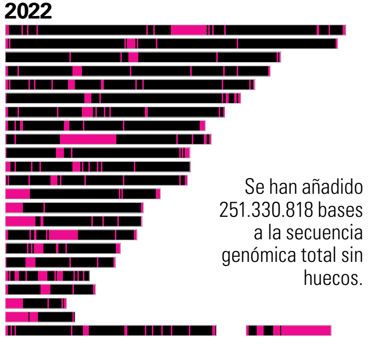
La ciencia ha tardado 22 años en descifrar el código genético humano

Por fin ha acabado la secuenciación de nuestro genoma. El Proyecto Genoma Humano ya cantó victoria en 2001, momento en que se había secuenciado casi todo el ADN de una persona. Pero han sido necesarias dos décadas más para descifrar el 8 por ciento restante del genoma. Estos últimos tramos contienen numerosas repeticiones y varían mucho de una persona a otra, lo que ha dificultado aún más su secuenciación. Se han descubierto cientos de genes nuevos, entre ellos algunos que participan en la respuesta inmunitaria y otros responsables de que el cerebro humano alcance un mayor desarrollo que el de nuestros antepasados primates. «Ahora que tenemos una referencia completa podemos entender la variación humana y saber cómo nos diferenciamos de otras especies cercanas», afirma el genetista Evan Eichler de la Universidad de Washington, uno de los presidentes del consorcio Telomere-to-Telomere, que ha ultimado la secuenciación.

Clara Moskowitz







FUENTES: UCSC GENOME BROWSER Y «THE COMPLETE SEQUENCE OF A HUMAN GENOME», SERGEY NURK ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 376, ABRIL DE 2022; MARTIN KRZYWINSKI (*GRÁFICOS*)

COMPORTAMIENTO ANIMAL

LA VARIEDAD DE SILBIDOS DEL DELFÍN

Los sonidos que identifican a cada individuo sitúan aparte a este cetáceo

Los silbidos «personales» que un delfín profiere para identificarse ante sus iguales y para transmitir información sobre sí mismo destacan por ser una de las formas más complejas de comunicación animal que se han estudiado. Nuevas investigaciones cuantifican ahora el grado de variación de esas llamadas en función del individuo y de la situación.

Un experto sabe reconocer con el tiempo el silbido de un delfín al escuchar sus llamadas a los compañeros. El sonido varía ampliamente, pues los delfines acostumbran a repetir tramos en bucle, a modificar el tono y a añadir o quitar segmentos cortos. Un estudio publicado hace poco en *Frontiers in Marine Science* ha evaluado todos esos cambios a partir de una base de datos con casi un millar de silbidos grabados de unos 300 individuos a lo largo de cuatro décadas.

Los autores midieron la variabilidad de los silbidos identificadores y la compararon con los de otras especies animales, sobre todo aves, mediante un cálculo estadístico que incluía 21 aspectos del sonido, como la duración, la frecuencia, el tono o el ritmo. Cuanto más variaban los aspectos de cada llamada en un individuo y más variaban las llamadas entre los individuos, más alta era la puntuación alcanzada por la especie. En un artículo reciente, los sonidos identificadores del delfín mular presentaron la mayor gama acústica, seguidos por los de las alondras; todavía no se ha llegado al consenso sobre el lugar que ocupa la especie humana.

El cálculo resulta adecuado para comparar especies, según la bióloga marina Laela Sayigh, del Instituto Woods Hole de Oceanografía, autora principal del estudio con delfines. Pero matiza que esos 21 aspectos apenas ahondan en la complejidad real de los silbidos. «Es verdaderamente fantástico» que, con esa medición burda, «los delfines resulten ser los comunicadores con más peculiaridades individuales», se maravilla.

A Pavel Linhart, ecoetólogo de la Universidad del Sur de Bohemia, que no ha participado en dicho estudio pero dirigió la comparación entre las especies, le alegra saber que se haya decidido medir esa variabilidad.

El estudio de por qué los delfines modifican su seña identificadora no ha hecho sino comenzar, pero entre las razones posiblemente destaque la expresión del estado de ánimo. Los trabajos por venir contribuirán a descifrar los silbidos comunes que estos cetáceos también intercambian, explica Sayigh. «Nuestro conocimiento del tema está en pañales.»

Rebecca Dzombak


FLIP NICKLIN/MINDEN PICTURES

Delfines mulares.

EVOLUCIÓN

MICROBIOS DEBAJO DEL SUELO

La geología confluye con la vida en las profundidades terrestres

El planeta rebosa de microbios hasta un kilómetro bajo el suelo. Hace tiempo que se pensaba que esas comunidades microbianas subterráneas, habitantes de los acuíferos y los manantiales geotérmicos, experimentaban pocas variaciones ecológicas. Investigaciones recientes indican, en cambio, que esas poblaciones son en realidad bastante dinámicas, con cambios en la composición de las especies que se precipitan en el plazo de días, no de siglos, y que la actividad geológica, como las fracturaciones de rocas a causa de las fuerzas de compresión o expansión, podría estar detrás de esas variaciones.

Las bacterias y los virus acuáticos que viven bajo la superficie permanecen aislados de alteradores ecológicos como la radiación solar, los cambios climatológicos y los impactos de meteoritos. Por su acceso limitado a los nutrientes y a la luz natural, tienden a crecer y a evolucionar con suma lentitud. Yuran Zhang, ingeniero de recursos energéticos de la Universidad Stanford, estaba estudiando el flujo de agua entre acuíferos de aguas geotermales cuando tuvo la idea de usar los microbios como indicadores. Como los embolsamientos de agua subterránea suelen estar aislados de los demás, su equipo y ella pensaron que el ADN microbiano podría servir como un buen identificador del agua de cada acuífero. Gracias a trabajos de ingeniería que estaban en marcha, «tuvimos acceso a valiosas muestras de líquido. Así que funcionó», explica.

En el estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Zhang y sus colaboradores explican cómo analizaron el agua de tres pozos de perforación conectados a acuíferos subterráneos. A lo largo de 10 meses tomaron muestras semanales y secuenciaron su ADN para saber los microbios contenidos en ellas. Al principio parecía que la composición de aquellos ecosistemas microbianos en miniatura estuviese esculpida en piedra. Pero para su sorpresa, la situación comenzó a cambiar en poco tiempo a raíz de la aparición de fisuras en el subsuelo de la zona de muestreo.

El equipo no tardó en reparar que cerrando y abriendo diminutos canales entre esos embolsamientos separados, los episodios de fracturación podían dar un vuelco completo a la ecología microbiana del acuífero en cuestión de días. «Nuestros resultados son interesantes porque no solo muestran un mecanismo distinto para la constitución de la comunidad, sino un mecanismo que es mucho más rápido», afirma la autora del estudio Anne Dekas, microbióloga de Stanford.

La geomicrobióloga de la Universidad de Colorado Alexis Templeton, ajena a la nueva investigación, califica el descubrimiento como fascinante: «No hay muchos estudios que expliquen cómo se desplaza el agua a través de los ambientes subterráneos y cómo eso afecta a la microbiología».

Investigaciones como la que nos ocupa darán pistas de cuál es el mejor modo para almacenar materias peligrosas, como residuos nucleares o dióxido de carbono, aclara Dekas. Hasta podrían ser útiles en la búsqueda de vida extraterrestre, pues se cree que las lunas del sistema solar que albergan agua, como Europa (satélite de Júpiter), albergan acuíferos en rocas duras similares.

Resulta tentador pensar en la geología como en una disciplina separada del reino de la vida, pero Templeton opina que estudios como este «nos muestran el estrecho vínculo que las une».

Joanna Thompson

THOMAS FUCHS

PALEONTOLOGÍA

TEJIDOS BLANDOS FOSILIZADOS

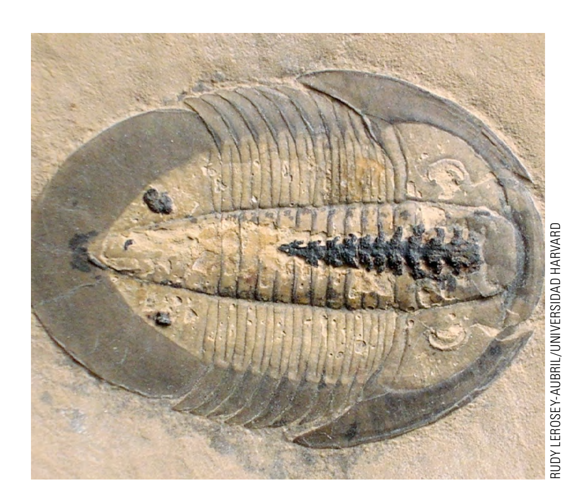
El pescado podrido revela secretos de los fósiles

Si todos los seres vivientes muriesen en este instante, algunos cálculos indican que solo el 1 por ciento quedarían conservados como fósiles. De menos aún se conservarían partes blandas. Estos tejidos que en tan raras ocasiones fosilizan aportan pistas esenciales sobre la biología y la evolución, pero su proceso de fosilización sigue envuelto en el misterio. ¿Por qué se hallan intestinos fosilizados, pero jamás se ha encontrado un hígado?

Un fósil se crea cuando un animal sin vida queda enterrado en sedimentos (como la mezcla de lodo y agua que cubre el lecho marino) y los minerales sustituyen partes del cuerpo muertas. Los paleontólogos tienen una predilección especial por el fosfato de calcio como agente fosilizador, porque este mineral conserva los órganos blandos con todo lujo de detalles, a veces hasta los mismísimos núcleos celulares. Dicho mineral solo se forma en ciertas condiciones ácidas, por lo que hace décadas que se teorizó que las diferencias en los valores de *p*H de los órganos en descomposición determinarían aquellos que se conservarían.

Para conocer mejor los cambios que experimentan los órganos al morir, Thomas Clements, paleontólogo de la Universidad de Birmingham, fue a la pescadería con un plan con el que echaría a perder cuatro lubinas deliciosas. Su equipo introdujo peachímetros en los órganos internos de los pescados antes de bañarlos en agua de mar artificial y dejar que actura la naturaleza.

Durante 70 días observaron cómo las lubinas se hinchaban primero, perdían después las partes carnosas y acababan desintegradas en una pila de espinas; en ese tiempo, las sondas medían continuamente los cambios en la bioquímica de las partes corporales. Publicados hace poco en *Paleontology*, los resultados muestran que, en las primeras 24 horas la acidez de todos los órganos alcanzó el intervalo adecuado para que el fosfato cálcico cristalizase, condiciones que duraron hasta cinco días. El equipo esperaba hallar diferencias claras entre los órganos, pero el cuerpo de los pescados se descompuso de manera uniforme en una masa putrefacta, de composición bastante homogénea, que se mantuvo cohesionada unos veinte días gracias a la piel.


RUDY LEROSEY-AUBRIL/UNIVERSIDAD HARVARD

Intestinos fosilizados.

Este hallazgo inesperado llevó a los autores a barajar otros posibles determinantes de la fosilización, como la concentración de fósforo en los tejidos. «Los músculos están llenos de fosfato. Y si este ya se encuentra allí, hay muchas posibilidades de que [el órgano] sea sustituido por fosfato cálcico», aclara Clements.

«Valdría la pena repetir lo mismo en otro tipo de animales», opina la paleontóloga Victoria McCoy, de la Universidad de Wisconsin en Milwaukee, ajenal estudio. Plantea que en el futuro podrían investigarse otros rasgos de los órganos en descomposición, como las concentraciones de otros elementos. También valdría la pena saber si la estructura física de los tejidos influye en la mineralización. «En muchos sentidos, el trabajo suscita más preguntas de las que habrían surgido si se hubiesen detectado gradientes de *p*H específicos órganos. Pero eso es lo que lo hace tan interesante», concluye McCoy.

Resulta tentador pensar en la geología como en una disciplina separada del reino de la vida, pero Templeton opina que estudios como este «nos muestran el estrecho vínculo que las une».

Sasha Warren

QUÍMICA

ESTRUCTURAS COMPLEJAS DEL AGUA

Las primeras imágenes de dos iones de hidrógeno hidratados corroboran una teoría de décadas de antigüedad

Para mejorar la eficiencia de la energía basada en el hidrógeno, desde la obtención de hidrógeno por electrólisis hasta las pilas de combustible de nueva generación, los científicos necesitan saber exactamente cómo se mueven los iones de hidrógeno en el agua.

Una molécula de agua neutra consta de dos átomos de hidrógeno enlazados a un único átomo de oxígeno, los cuales forman una estructura con un polo parcialmente positivo y otro negativo, como un imán. Si pudiera ampliarse lo suficiente la imagen de un vaso de agua, se observarían billones de moléculas de este tipo, junto con un exceso de átomos de hidrógeno que han perdido sus electrones (en otras palabras, protones). Desde hace 200 años, se ha especulado con que estos protones saltan de una molécula de agua a otra, uniéndose a la más cercana y desplazando uno de los protones que ya estuviera acoplado a ella. Este protón se transferiría entonces a una molécula vecina. Ahora, un equipo de científicos de Pekín ha obtenido por primera vez imágenes de estas partículas al microscopio, lo que ayudará a esclarecer cómo se producen dichos saltos.

Los modelos predecían que a menudo este proceso tiene lugar de dos formas. En la primera, un protón se une directamente a una sola molécula de agua, convirtiéndola en un ion positivo. Entonces, tres moléculas neutras de agua circundantes se orientan de modo que los polos parcialmente negativos estabilizan la carga. En la segunda opción, el protón adicional se sitúa entre los extremos negativos de dos moléculas de agua neutras, de modo que entre las dos comparten la carga positiva.

Los investigadores lograron confirmar estas orientaciones mediante microscopía de fuerza atómica, una técnica que mide la topografía de la superficie de una muestra por medio de la punta nanoscópica de una aguja especializada. Usando dicho instrumento, la química de la Universidad Normal de Pekín Jing Guo y sus colaboradores obtuvieron imágenes de una red de moléculas de agua congelada sobre una lámina de metal, que revelaban cómo los protones adicionales modificaban la red. El estudio se ha publicado en la revista *Science*.

Para detectar las dos configuraciones del agua se precisaron mediciones sumamente sensibles. «La posición de los protones a lo largo del enlace de hidrógeno no difería solo en unos veinte picómetros», señala Guo, lo cual equivale a menos de la mitad del radio de un átomo de hidrógeno. «Nos entusiasma haber descifrado los aspectos subyacentes después de tantos esfuerzos.»

El equipo descubrió que estas dos estructuras se producían con frecuencias y proporciones diferentes según el tipo de metal sobre el que se congelaba el agua. También utilizaron corrientes eléctricas para inducir que el agua alternara entre las distintas conformaciones. «Es muy sorprendente que puedan observar [directamente] estos fenómenos», comenta Thomas Kuhn, químico teórico de la Universidad de Paderborn, que no participó en la investigación. «Ello abre la puerta a estudiar los mecanismos que se encuentran detrás [de la generación de hidrógeno]», declara. «Y quizá de ahí surjan hallazgos interesantes.»

Lars Fischer y Fionna M. D. Samuels

THOMAS FUCHS

MEDICINA

EL ABORTO FARMACOLÓGICO

La interrupción del embarazo con mifepristona y misoprostol es segura y eficaz

En 2016, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) de Estados Unidos aprobó una combinación de dos medicamentos, la mifepristona (también llamada RU-486) y el misoprostol, para inducir el aborto sin cirugía. En 2019, los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades comunicaron que alrededor del 42 por ciento de todos los abortos de ese país se practicaron con medicamentos. [En España fue del 19 por ciento en 2020, según se desprende de un informe del Ministerio de Sanidad.]

El proceso comienza con la toma de mifepristona antes de transcurridas diez semanas desde la última menstruación. Uno o dos días después se toma el misoprostol. Aunque ambos fármacos funcionan por separado, son más eficaces juntos. La mifepristona bloquea la acción de la progesterona en el útero, que queda incapacitado para sustentar la gestación. El misoprostol, además de otras acciones, inicia las contracciones uterinas.

Los estudios han demostrado que el aborto farmacológico es seguro y eficaz. Así, en uno de la Universidad de California en Los Ángeles llevado a cabo en 2015, el 99,6 por ciento de las más de 30.000 mujeres que deseaban abortar con medicamentos pudieron interrumpir el embarazo. Según una revisión de ensayos clínicos publicada en 2013, con la administración conjunta de mifepristona y misoprostol, solo el 0,3 por ciento de las más de 45.000 mujeres estudiadas presentaron complicaciones que precisaron hospitalización. Hubo fallos ocasionales del tratamiento en embarazos de más de ocho semanas o si no se habían seguido las instrucciones. La tasa de mortalidad asociada a los medicamentos es inferior al 0,001 por ciento.

Megha Satyanarayana

Mifepristona (también llamada RU-486, con nombres comerciales como Mifegyne)

1 La molécula mifepristona se une al receptor de la progesterona en las células del útero y bloquea la acción de la hormona

Mifepristona
Receptor de progesterona
Progesterona bloqueada

2 En ausencia de progesterona, se producen los siguientes cambios:

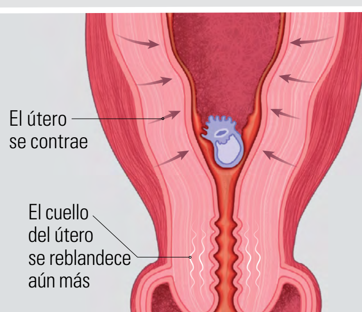
El embrión se desprende
El endometrio se descompone
Los músculos uterinos se distienden para contraerse
El cuello del útero se ablanda, lo que posibilita su apertura

Misoprostol (con nombres comerciales como MisoOne o Cytotec)

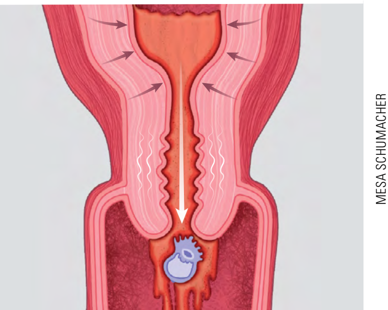
3 El misoprostol, que es una forma sintética de prostaglandina, actúa en el útero igual que la hormona natural.

Misoprostol
Receptor de prostaglandina

4 Una vez que la mifepristona ha surtido efecto, el misoprostol provoca los siguientes cambios:



5 El endometrio y el embrión son expulsados del útero, lo que provoca en la embarazada una menstruación abundante.



MESA SCHUMACHER

BATERÍAS DE PAPEL DESECHABLES

Una batería de papel y agua podría reducir la chatarra electrónica

Los dispositivos electrónicos desechados se acumulan a pasos agigantados, lo que alienta a los investigadores a explorar formas creativas de reducir esta basura electrónica. Ahora, un equipo ha desarrollado una batería desechable, hecha de papel y otros materiales sostenibles, que se activa con el agua.



ALEXANDRE POULIN

Los cables, las pantallas y las baterías que componen nuestros dispositivos (sin olvidar los plásticos, los metales y otros materiales que los recubren) están llenando de residuos peligrosos los vertederos. Algunos de ellos son relativamente grandes, como los teléfonos móviles antiguos y los aparatos de aire acondicionado. Otros son más insidiosos, como los equipos de diagnóstico médico de un solo uso, los sensores ambientales y las etiquetas inteligentes que contienen baterías desechables.

«Estas pequeñas baterías suponen un gran problema», comenta Dele Ogunseitan, especialista en salud pública de la Universidad de California en Irvine, que no estuvo involucrado en el estudio pero que investiga técnicas ecológicas y asesora a importantes compañías tecnológicas. «Nadie parece prestar atención sobre a dónde van a parar.»

Los investigadores del Laboratorio de Materiales de Celulosa y Madera, de los Laboratorios Federales Suizos de Ciencia y Tecnología de Materiales, se afanan en resolver este problema. Su nuevo artículo, publicado en *Scientific Reports*, describe una batería de papel que se activa con el agua, desarrollada a partir de materiales respetuosos con el ambiente, la cual podría suponer una alternativa sostenible a las pilas más perjudiciales que suelen emplearse en los dispositivos de baja potencia.

La batería de papel contiene los mismos componentes básicos que las pilas normales, pero los empaqueta de forma diferente. Al igual que una pila química típica, consta de un polo con carga positiva denominado cátodo, un polo con carga negativa denominado ánodo y, entre ambos, un material conductor denominado electrolito. Los componentes de los dispositivos tradicionales están recubiertos de plástico y metal; en la nueva batería, el ánodo y el cátodo los constituyen tintas impresas en el anverso y el reverso de un trozo de papel impregnado de sal, la cual se disuelve cuando se humedece con agua. La solución salina resultante actúa como electrolito.

Los investigadores impusieron como requisito previo el uso de materiales sostenibles, por lo que en el desarrollo de su dispositivo solo consideraron componentes inocuos y abundantes. «Estábamos convencidos de que al final lograríamos algo que funcionaría, pero el desarrollo de estos materiales y sistemas de tinta dista de ser trivial», declara Gustav Nyström, director del Laboratorio de Materiales de Celulosa y Madera y autor principal del estudio. Tras probar cientos de fórmulas, los investigadores se decantaron por una tinta de grafito para el cátodo, una tinta de zinc para el ánodo y un papel impregnado de sal como electrolito.

Cuando el papel está seco, la batería se mantiene estable. Sin embargo, si se añaden un par de gotas de agua, la sal se disuelve, lo que permite el flujo de electrones. Una vez humedecido el papel, la pila se activa en menos de 20 segundos. En ese momento, si no se encuentra conectada a un dispositivo electrónico, genera un voltaje constante de 1,2 voltios. (A modo de comparación, el voltaje de una pila AA es de 1,5 voltios.) Su rendimiento operativo disminuye al secarse el papel. En los ensayos, cuando el papel volvía

a mojarse, el sistema recuperaba su funcionalidad, y la mantenía durante una hora antes de que empezara a secarse de nuevo.

A pesar de que los investigadores demostraron que podían alimentar un reloj despertador, es poco probable que las baterías de papel desechables desplacen a las pilas AA estándar de las estanterías de las tiendas. No obstante, Nyström prevé un futuro en el que estas baterías se emplearán en pruebas diagnósticas y sensores ambientales, idealmente junto con otros componentes sostenibles, como pantallas y envoltorios.

Quizás el futuro no se halle tan lejos. Resulta difícil predecir cuánto tardarán en fabricarse estos dispositivos a gran escala, pero Nyström asegura estar en contacto con socios industriales potenciales y cree que podrían comercializarse en un plazo de entre dos y cinco años. «Creo que el rendimiento observado es suficiente para muchas de estas aplicaciones», afirma. La cuestión radica principalmente en aumentar la producción e integrar las baterías en sistemas como las pruebas diagnósticas y los sensores ambientales.

«Este es un trabajo que en realidad deriva del desarrollo de materiales sostenibles», explica Nyström. A partir de ahí, añade, «creo que hemos logrado crear algo de bastante utilidad».

Anna Blaustein

EPIDEMIOLOGÍA

LA COVID-19 EN LOS ANIMALES

Una nueva base de datos permite el seguimiento de la propagación del virus SARS-CoV-2 en los mamíferos

El virus causante de la COVID-19 es un saco prolífico de genes que no solo afecta a la especie humana, sino también a los animales. Y del mismo modo que humanos y animales se infectan unos a otros, las especies animales pueden infectarse entre sí, explica Amélie Desvars-Larrive, epidemióloga de la Universidad de Veterinaria de Viena. La ciencia ha averiguado mucho sobre las vías de contagio de la COVID en las personas, pero no tanto en los animales.

A fin de facilitar el estudio de las conexiones entre los seres humanos, los animales y el virus, Desvars-Larrive y un equipo de investigadores han recopilado los informes dispersos de mamíferos con COVID en todo el mundo y han creado una base de datos pública.

Saber de qué modo se propaga el virus entre otras especies de mamíferos, y cómo pasa de ellas a la especie humana, nos ayudará a gestionar mejor la pandemia actual y a prepararnos para la siguiente.

«No podemos seguir centrándonos en la población humana ni seguir manteniendo un punto de vista antropogénico en esta pandemia», advierte Desvars-Larrive.

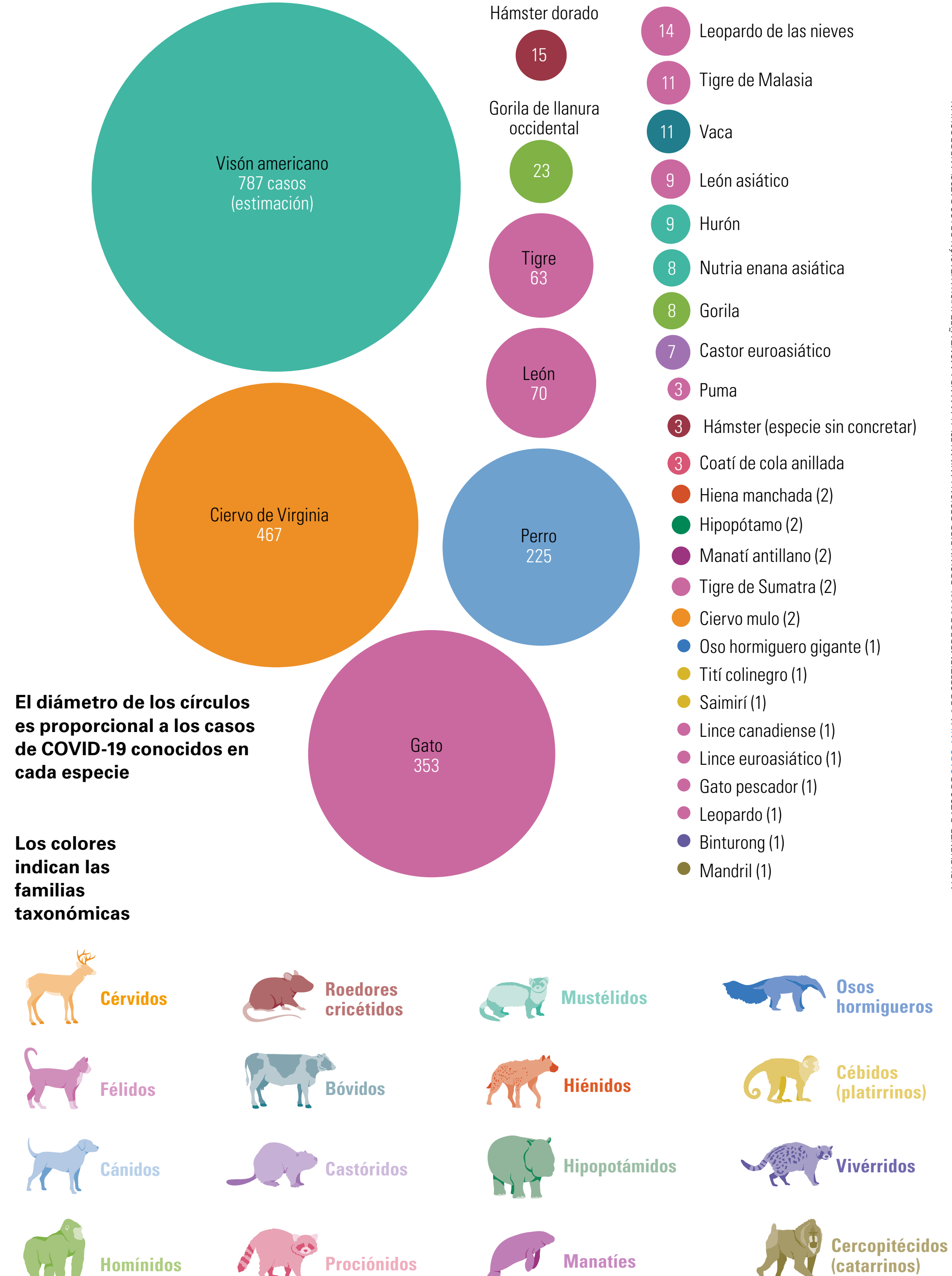
La COVID ha demostrado ser muy contagiosa en numerosas especies de mamíferos: la infección se ha diseminado como la pólvora entre visones criados en cautividad, hasta el punto de que las granjas peleteras afectadas se han visto obligadas a sacrificar a todos los animales para ponerle freno. Los ciervos parecen especialmente sensibles al virus. Numerosos felinos, grandes y pequeños, también parecen ser presa fácil. Barbara Han, ecoepidemióloga del Instituto Cary de Estudios Ecosistémicos en Millbrook, Nueva York, que no ha participado en el proyecto de la base de datos, afirma que disponer de toda esa información de forma centralizada, en lugar de dispersa por múltiples fuentes gestionadas por organizaciones y organismos oficiales, seguramente permitirá a su equipo predecir con mayor rapidez el comportamiento del virus.

La base de datos no cesa de crecer con el análisis de nuevos animales y la difusión de los resultados, por lo que todos esperan que ayudará a seguir los contagios de COVID entre la fauna y entre esta y las personas. Han afirma que, más allá del mero recuento de las especies infectadas, la base hará más fácil la tarea de

estudiar cómo afecta el virus SARS- CoV-2 a las comunidades de mamíferos y a los ecosistemas en conjunto.

«A la gente le sorprende que el patógeno haya infectado ya a tantos animales y lo que eso podría significar para el género humano. Si no contamos con información fiable acerca del tipo de animales que lo padecen, no obtendremos respuestas correctas», advierte.

Megha Satyanarayana



ALEX FUENTE: DATOS DE SARS-ANI (A 6 DE SEPTIEMBRE DE 2022); BROWN BIRD DESIGN (*ANIMALES*); Y AMANDA MONTAÑEZ (*VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS*) ANDRE POULIN

LA IMAGEN DEL MES

LA TRAMPA DE UNA PLANTA CARNÍVORA

Desvelada la táctica de caza de la planta jarra

Las peculiares estratagemas de las plantas carnívoras llevan siglos captando la atención de curiosos y del público en general. Dentro de este grupo vegetal, cuyos mecanismos de captura han evolucionado varias veces de forma independiente, destacan algunas rarezas. La llamativa *Nepenthes gracilis*, del sudeste asiático, aprovecha la energía cinética de la lluvia para tender su trampa a los animales. Un nuevo **estudio** publicado en *Biology Letters* demuestra que la estructura de su jarra, una hoja modificada, hace que la inusual estratagema funcione.

La jarra presenta una tapa horizontal rígida que deja expuesto un envés nectarífero, donde se posan los insectos atraídos por el señuelo. Cuando una gota cae sobre la parte superior de la tapa, esta se inclina hacia abajo y lanza al incauto a los jugos digestivos acumulados en el fondo de la jarra. Anne-Kristin Lenz, de la Universidad de Bristol y autora principal del estudio, y sus colaboradores analizaron cortes transversales de las jarras con la tapadera en posición levantada, bajada y neutra mediante tomografías de alta resolución. Los resultados revelaron un punto débil estructural en el cuello de la jarra al que los investigadores denominaron muelle de torsión. Cuando una gota golpea la tapa, el punto débil se dobla y obliga a descender a la tapa, de modo similar a un trampolín. El punto débil hace que el cuerpo de la jarra se doble y regrese a la posición inicial siempre del mismo modo, de forma que la tapa vuelve a levantarse sin rebotar demasiado, a diferencia de las oscilaciones erráticas que experimenta cualquier hoja golpeada por la lluvia. Los autores también descubrieron que una planta jarra estrechamente emparentada, *Nepenthes rafflesiana*, carece de este mecanismo.

Aunque las trampas pluviales de momento parecen exclusivas de *N. gracilis*, se espera que los trabajos futuros ahonden en la amplia diversidad de tácticas de caza observadas entre las plantas carnívoras.

Darren Incorvaia



PAUL STAROSTA/GETTY IMAGES

INFORME ESPECIAL
HALLAZGOS SOBRE AGUJEROS NEGROS

AGUJEROS MENOS NEGROS



Para muchos, los agujeros negros evocan una misteriosa oscuridad que amenaza con devorarlo todo. Y los científicos, en ocasiones, los han visto como el misterio que amenazaba con devorar la física. Los agujeros negros tienden un puente entre la mecánica cuántica y la relatividad general y, con ello, ponen de relieve graves carencias en nuestra comprensión de la naturaleza. Pero algunos avances teóricos y observacionales recientes han arrojado luz sobre estos inescrutables objetos, con profundas implicaciones que van más allá de los propios agujeros negros.

En las páginas siguientes, George Musser describe el modo en que se ha comenzado a aclarar la llamada paradoja de la información, un problema relacionado con los agujeros negros que lleva décadas abierto. Uno de los físicos que participó en esos trabajos, Ahmed Almheiri, nos explica la sorprendente solución. Otro físico, Edgar Shaghoulian, expone cómo estas ideas podrían ayudarnos incluso a entender el universo en su conjunto. Seth Fletcher escribe sobre el Telescopio del Horizonte de Sucesos, que ha captado la primera imagen del agujero negro central de la Vía Láctea. Y el experto en ondas gravitacionales Carlos F. Sopuerta nos habla sobre la misión espacial LISA, que permitirá caracterizar los agujeros negros supermasivos y poner a prueba la relatividad general y otras teorías gravitatorias.

Gracias a todas esas investigaciones, los agujeros negros empiezan a parecer un poco menos oscuros y enigmáticos.

Clara Moskowitz, editora

OLENA SHMAHALO

FÍSICA TEÓRICA

¿AGUJEROS NEGROS SIN PARADOJA?

George Musser | Dos equipos de investigadores han logrado el primer gran avance para explicar la paradoja de la información, uno de los misterios más profundos de la física

RACHELTUNSTALL

EN SÍNTESIS

¿Destruyen los agujeros negros la información de lo que cae en ellos? El hecho de que se evaporen parece indicar que así es, pero eso chocaría de frente con la reversibilidad temporal de las leyes físicas.

En los últimos años se ha producido un gran avance para solucionar esta paradoja, basado en la existencia de agujeros de gusano que conectarían el interior de los agujeros negros con el mundo exterior.

Aunque los resultados son controvertidos y existen otras propuestas, todo apunta a que los agujeros negros dejan escapar la información y no señalan una inconsistencia interna de las teorías actuales.

Hace algunos años, un equipo de químicos logró «descocer» un huevo. La cocción hace que las proteínas del huevo se enrollen unas sobre otras, y una centrifugadora puede desenmarañarlas y devolverlas a su estado original. Si bien esta técnica es de dudosa utilidad en la cocina, muestra de forma elegante la reversibilidad de la física: todo lo que vemos a nuestro alrededor puede evolucionar tanto hacia delante como hacia atrás en el tiempo. Esta es una de las propiedades más profundas de las leyes físicas, reflejo de las simetrías del espacio, el tiempo y la causalidad. Si consiguiéramos invertir la evolución de todas las partes de un sistema, lo hecho se desharía. Y la información necesaria para lograrlo siempre se conserva. Por supuesto, aunque revertir un proceso pueda resultar sencillo en un sistema simple, en uno complejo no lo es tanto, y esa es la razón por la que el «descocedor» de huevos resultó tan ingenioso.

Pero en este tema de la reversibilidad hay una notoria excepción: los agujeros negros. Cuando una estrella lo bastante masiva se derrumba bajo su propio peso, su gravedad se intensifica sin límite y confina irremisiblemente la materia. Si cayésemos en uno de esos objetos, no habría vuelta atrás, y cuando se fusionan dos de ellos, no hay forma de volver a separarlos. El aspecto exterior de un agujero negro apenas presenta rasgos distintivos: mirándolo, no sabríamos decir qué ha caído dentro. En definitiva, los agujeros negros no parecen preservar la información. Esta irreversibilidad, advertida en 1958 por el físico David Finkelstein, fue el primer indicio de la paradoja de la información en los agujeros negros, que nos lleva a preguntarnos cómo es posible que unas leyes reversibles tengan efectos irreversibles. Todo esto pone de manifiesto profundas carencias en nuestra compresión del universo. Los físicos tienen muchas razones para buscar una teoría unificada de la naturaleza, pero la paradoja de la información es su motivación más concreta, y la que ha guiado sus pasos cuando no tenían mucho más a lo que agarrarse.

Por fin, más de sesenta años después de que comenzara a emerger este rompecabezas, los investigadores parecen albergar esperanzas de hallar una solución. Durante el año anterior a la pandemia y los meses del confinamiento, un equipo de físicos teóricos hizo enormes progresos para entender la paradoja: hay quien lo considera el mayor avance de las últimas décadas. Con ello reforzaron la idea de que, pese a las apariencias, los agujeros negros son reversibles. Y eso da al traste con la paradoja oficial: la teoría física ya no está reñida consigo misma. No obstante, los resultados son controvertidos y, como admiten sus propios autores, representan a lo sumo un primer paso hacia una descripción completa de los agujeros negros.

Hasta hace poco, la mayoría de los «avances» que habían logrado los físicos en relación con la paradoja de la información habían consistido en percatarse de que el problema era aún más difícil de lo que pensaban. El trabajo original de Finkelstein tenía lagunas. Una de ellas es que estaba basado en la relatividad general de Einstein, una teoría que deja fuera los efectos cuánticos y, en consecuencia, no es completa. En los años setenta, Stephen Hawking hizo un primer intento de incluir esos efectos, en el artículo que le hizo célebre [*véase* «La mecánica cuántica de los agujeros negros», por Stephen Hawking; Investigación y Ciencia, marzo de 1977]. Sus cálculos predicen que los agujeros negros liberan energía lentamente, pero esa emisión no lleva consigo información alguna sobre lo que hubiera podido caer en el agujero negro, así que no ayuda a revertir el proceso. Si acaso, el flujo continuo de partículas empeora la situación: el agujero negro acabará por perder toda su energía y se evaporará como un charco en un día de verano, con lo que el rastro de la materia retenida en él se esfumará para siempre. El análisis de Hawking convirtió la inquietud general en una crisis total de la física.

En 1993, Don Page, un antiguo estudiante de doctorado de Hawking que ahora trabaja en la

Universidad de Alberta, agravó aún más el problema. Demostró que, si un agujero negro liberara la información que contiene, no podría esperar a sus postreros instantes para hacerlo, sino que tendría que empezar hacia la mitad de su vida. Y eso es relevante, porque un agujero negro de mediana edad apenas habría menguado respecto a su tamaño original, por lo que debería seguir gobernado por las leyes ordinarias de la física. Por lo tanto, no es posible achacar todo el problema a algún tipo de física exótica desconocida, lo que apunta a una inconsistencia en el seno de las teorías más consolidadas. Y en 2009, Samir Mathur, de la Universidad Estatal de Ohio, probó que modificar ligeramente el cálculo de Hawking tampoco resolvía el problema. Se les estaba escapando algo muy importante.

La clave de los análisis de Page y Mathur era el entrelazamiento cuántico, un tipo especial de correlación que pueden presentar las partículas aunque no haya ninguna fuerza o influencia que las ligue. El entrelazamiento es misterioso en sí mismo, pero los físicos pueden dejar eso a un lado y preguntarse por su significado en el contexto de los agujeros negros. La mayoría de las partículas que caen en un agujero están entrelazadas con otras que permanecen en el exterior, y esos vínculos deberían mantenerse para que el agujero negro preservara la información. Sin embargo, la correlación no puede transferirse a las partículas que forman la radiación predicha por Hawking sin causar otros problemas, tal y como demostraron en un influyente trabajo de 2013 Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski y James Sully, que por entonces trabajaban en la Universidad de California en Santa Bárbara.

Así pues, puede que los agujeros negros sean reversibles, pero la confusión de los teóricos va en una única dirección. El lado positivo es que el estudio de la paradoja ha generado nuevas ideas acerca de la gravedad, el espaciotiempo y la unificación de las interacciones. Por ejemplo, los agujeros negros implican que el espacio solo tiene cabida para una cantidad limitada de materia: no es posible amontonarla de forma indefinida en un volumen dado sin que colapse y dé lugar a un agujero negro. Y, curiosamente, esa capacidad de almacenamiento no depende del volumen, sino del área de la superficie que lo delimita. El espacio parece tridimensional, pero actúa como si tuviera dos dimensiones. Posee un carácter ilusorio del que no solemos ser conscientes, pero que se pone de manifiesto en los agujeros negros.

Esa constatación constituye la base del «principio holográfico», una de las ideas más fascinantes y desconcertantes de la física teórica moderna, según la cual una de las dimensiones que vemos en la naturaleza no es fundamental, sino que emerge como resultado de la dinámica cuántica. La versión más desarrollada del principio holográfico es la llamada dualidad AdS/CFT, que relaciona el espaciotiempo de anti-De Sitter (AdS) con una teoría de campos conforme (CFT, por sus siglas en inglés). Este esquema concibe el universo como una gigantesca bola, un espacio tridimensional con gravedad (el espaciotiempo de AdS) limitado por una frontera bidimensional en la que habita la CFT. Ambas descripciones son matemáticamente equivalentes (es decir, duales) aunque algunos teóricos consideran que la frontera es más fundamental y el interior surge a partir de ella. Todo lo que ocurre dentro de la esfera tiene un paralelo en el mundo de sombras de la frontera. Así, si un planeta orbita en torno a una estrella en el interior, las sombras de ambos objetos ejecutan una pequeña danza en la superficie.

Con los años, los físicos han ido perfeccionando esa dualidad y ya no se limitan a identificar un espacio tridimensional con uno de dos dimensiones, sino que pueden relacionar partes concretas del primero con otras del segundo. También son capaces de asociar cantidades físicas definidas en ambos espacios. La versión más avanzada de esta correspondencia la desarrollaron en 2014 Netta Engelhard y Aron Wall, por entonces también en la Universidad de California en Santa Bárbara, y asocia el área de las superficies con la cantidad de entrelazamiento cuántico. Estas variables tan diferentes en el fondo son lo mismo, lo que permite vislumbrar la unidad fundamental de toda la naturaleza.

Con esos ingredientes sobre la mesa, los físicos teóricos volvieron a abordar la paradoja de la información en los agujeros negros. En 2019, Almheiri, Engelhardt, Marolf y Henry Maxfield, así como Geoffrey Penington (por separado y empleando métodos similares), demostraron que la información puede escapar del agujero negro de la forma prescrita por Page [*véase* «Agujeros negros, agujeros de gusano y entrelazamiento», por Ahmed Almheiri, *en este mismo número*]. Con ello, confirmaron que los agujeros negros, después de todo, son sistemas reversibles. Ese mismo año, estos y otros autores (agrupados de nuevo en dos equipos independientes) verificaron que la radiación emitida contiene la información

que libera el agujero negro. Esta vez los cálculos no reposaban directamente en la dualidad AdS/CFT, sino en las mismas técnicas matemáticas usadas por Hawking. Y es que si, como razonó Page, la paradoja aparece en el régimen de validez de teorías bien establecidas, su resolución no debería depender de algo tan elaborado como la dualidad AdS/CFT.

Los agujeros negros ya no resultan paradójicos: ya no representan una inconsistencia interna de la teoría

Y ambos grupos confirmaron que no lo hace. Un agujero negro produce una cantidad tan ingente de entrelazamiento que la geometría del espaciotiempo experimenta una transición drástica. Dentro del agujero negro y en sus alrededores, el espaciotiempo adopta formas intrincadas, entre las que habría agujeros de gusano similares a los portales espaciotemporales de la ciencia ficción. Estos conectan el interior del agujero negro con el mundo exterior, aunque todavía no está claro cómo permiten que escape la información. Esa transición geométrica, por extraña que parezca, encaja a la perfección en el marco de la física conocida. Digamos lo que digamos sobre los agujeros negros, ya no resultan paradójicos, es decir, ya no representan una inconsistencia interna de las teorías actuales.

Los cálculos de esos trabajos resultaban abrumadores incluso para los estándares de la física moderna. Los escépticos quedaron impresionados, aunque eso no les impidió buscar fallos en el argumento. Cuando la discusión se hallaba en su máximo apogeo, llegó la pandemia y la ciencia quedó confinada: las reuniones presenciales no se retomaron hasta finales de 2021. Algunos físicos afirman que hacer ciencia a través de Zoom no es lo mismo, y que los partidarios de la idea y los escépticos aún tienen que verse las caras. «Ahora el campo está más escindido, y una parte de ello también podría achacarse a la pandemia», opina Suvrat Raju, del Instituto Tata de Investigación Fundamental de Bangalore.

En una crítica especialmente aguda, Raju y sus colaboradores (Andreas Karch, Carlos Pérez Pardavila, Lisa Randall, Marcos Riojas y Sanjit Shashi) alegaron que el marco elegido por ambos equipos de investigación era muy artificioso. Eso mismo se puede decir, hasta cierto punto, de casi todos los modelos teóricos, pero en este (según esos autores) se hacen algunas suposiciones nada inocentes. Por ejemplo, que la gravedad no solo se vuelve más débil con la distancia, sino que acaba por desaparecer. Dicha hipótesis cambia de manera fundamental la naturaleza de esa fuerza, por lo que, aunque los cálculos sean correctos, dirían poco acerca de la gravedad o los agujeros negros del mundo real.

Mathur y otros autores también han señalado que los nuevos trabajos recurren a un efecto no local (que no se propaga a través del espacio, sino que salta de un punto a otro) para extraer la información del agujero negro. Esto, de por sí, no es sorprendente: existe un amplio consenso entre los físicos sobre la necesidad de incluir efectos no locales para dar sentido a los agujeros negros. Pero el tipo concreto de no localidad presente en los últimos análisis resulta poco verosímil para algunos escépticos.

Tanto Raju como Mathur abogan por soluciones alternativas para la paradoja de la información. Raju sugiere que la información no necesita salir del agujero negro porque, de hecho, ya está fuera: la gravedad tiene un alcance ilimitado, y eso impide que la información quede retenida, afirma. Los campos gravitatorios, electromagnéticos y de otros tipos presentes en el exterior del agujero negro conservarían una huella de todo lo que cae en su interior. Según Raju, «esa región está repleta de información». Por su parte, Mathur propone que los agujeros negros, en realidad, nunca llegan a formarse. Cuando una estrella comienza a derrumbarse, sostiene, se pone en marcha la física exótica de la teoría de cuerdas, según la cual todas las partículas son modos de vibración de una forma de materia más fundamental. Esos efectos detendrían el colapso y dejarían detrás una estrella muy compacta, conocida como «bola de pelusa» (*fuzzball*). Ese pequeño astro nunca estaría aislado del exterior, y la información emergería con su luz.

Esas ideas y sus variantes también tienen sus detractores. No hay duda de que los enfoques de Mathur y Raju son muy diferentes, así que la ver-

dadera naturaleza de los agujeros negros continúa sin estar clara. Y, como de costumbre, a los teóricos se les sigue dando mejor hallar nuevos problemas que resolver los que ya existen. Leonard Susskind, de la Universidad Stanford, ha puesto de relieve otra paradoja relacionada con los agujeros negros: el espacio en su interior está tan deformado que su volumen debería crecer eternamente, pero tal expansión violaría el principio de que todo sistema cerrado ha de alcanzar el equilibrio. Así pues, tendría que entrar en juego algún tipo desconocido de física que estabilizara el interior.

Susskind y otros también creen que los agujeros negros son sistemas extremadamente caóticos, que se arremolinan y bullen bajo sus anodinas fachadas. Al menos, este aspecto se puede estudiar por medio de simulaciones informáticas y experimentos de laboratorio. Aunque crear un agujero negro real esté más allá de sus posibilidades, los físicos experimentales investigan el mismo tipo de dinámica caótica en iones o condensados. Primero dejan evolucionar el sistema, para luego revertir el proceso. Llevarlo de vuelta al mismo punto de partida requiere una precisión exquisita, lo que demuestra por qué los agujeros negros podrían parecer irreversibles aunque, en principio, no lo fueran.

Entretanto, los teóricos creen que lo que funciona para un agujero negro también podría servir para el universo en su conjunto. Al expandirse de manera acelerada, el universo posee una superficie unidireccional muy parecida al horizonte de sucesos de los agujeros negros. Por ello, cabe esperar que lo que aprendamos sobre estos últimos pueda desvelar también secretos sobre el cosmos [*véase* «Una historia de dos horizontes», por Edgar Shaghoulian, *en este mismo número*].

A decir verdad, los físicos están encantados de que los agujeros negros estén resultando tan difíciles de descifrar: si el problema es tan complejo, la solución ha de ser profunda.

George Musser es redactor colaborador de *Scientific American* y autor de los libros *Spooky action at a distance* y *The complete idiot's guide to string theory*. Ha recibido los premios de periodismo científico del Instituto Americano de Física y de la Sociedad Americana de Astronomía.



EN NUESTRO ARCHIVO

Los agujeros negros y la paradoja de la información. Leonard Susskind en *IyC*, junio de 1997.

La información en el universo holográfico. Jacob D. Bekenstein en *IyC*, octubre de 2003.

Agujeros negros y muros de fuego. Joseph Polchinski en *IyC*, abril de 2015.

Cómo fugarse de un agujero negro. Steven B. Giddings en *IyC*, febrero de 2020.

La paradoja más famosa de la física se acerca a su fin. George Musser en *IyC*, febrero de 2021.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Javier Grande Bardanca, Yvonne Buchholz

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307, 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN

InboundCycle
Plaza Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN:

Andrés Martínez: *Apuntes*, *La trampa de una planta carnívora* y *salvemos las serpientes* (ed.); **José Óscar Hernández Sendín:** *Apuntes* y *La inteligencia artificial escribe sobre sí misma*; **Guillem Pérez Nadal:** *Agujeros menos negros, Historia de dos horizontes* y *Una vista de nuestro agujero negro;* **Miguel A. Vázquez Mozo:** *¿Agujeros negros sin paradoja?* y *Agujeros negros, agujeros de gusano y entrelazamiento*; **Alfredo Marcos:** *Modelos matemáticos y pandemias*; **Fabio Teixidó:** *El daño climático causado por la ciencia*; **Gonzalo Claros:** *Del ARN a las primeras moléculas de la vida*; **Anna Romero:** *Salvemos las serpientes* (trad.)

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth

PRESIDENT
Kimberly Lau

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:
1 año 75€ / 2 años 140€

La suscripción incluye el acceso completo a la hemeroteca digital (todos los números publicados desde 1976).

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

INFORME ESPECIAL

HALLAZGOS SOBRE AGUJEROS NEGROS

FÍSICA TEÓRICA

AGUJEROS NEGROS, AGUJEROS DE GUSANO Y ENTRELAZAMIENTO

Ahmed Almheiri | La paradoja de la información puede quedar resuelta si los interiores de distintos agujeros negros están conectados por agujeros de gusano

HARRY CAMPBELL

La física teórica lleva en crisis desde 1974, cuando Stephen Hawking argumentó que los agujeros negros destruyen la información. Lo que mostró Hawking es que un agujero negro puede evaporarse, convirtiéndose poco a poco, junto a todo lo que contiene, en una anodina nube de radiación. En este proceso parece perderse la información acerca de lo que cayó en el agujero negro, lo cual violaría un principio fundamental de la física.

El problema lleva abierto más de 45 años, pero las piezas del rompecabezas comenzaron a encajar en 2019, gracias a algunos estudios en los que participé. La solución se basa en una nueva compresión del espaciotiempo y de cómo puede reconectarse a través del entrelazamiento cuántico. Eso conduce a la idea de que una parte del interior del agujero negro, la llamada «isla», en verdad se encuentra fuera.

Para entender cómo hemos llegado a esas nuevas ideas, debemos empezar hablando del carácter inexorable de los agujeros negros.

Una avenida de sentido único

Nada parece más inútil que intentar escapar de un agujero negro. De hecho, tal imposibilidad es lo que define a esos objetos. Los agujeros negros se forman cuando hay tanta materia concentrada en una región tan pequeña que el espaciotiempo se derrumba sobre sí mismo en un violento ciclo de compresiones y estiramientos que traen consigo más compresiones y estiramientos. Esas «fuerzas de marea» se hacen infinitas en un tiempo finito y marcan el abrupto fin de toda una región del espaciotiempo en la llamada singularidad del agujero negro, un punto donde el tiempo se detiene y el espacio deja de tener sentido.

En la región donde se produce el colapso, existe una superficie que separa la zona desde la que aún es posible escapar y el punto de no retorno. Se trata del horizonte de sucesos, el último lugar desde el que un rayo de luz podría evitar acabar en la singularidad. Nada que atraviese el horizonte podrá escapar, a no ser que viaje más rápido que la luz (un imposible físico): permanecerá de manera irremediable en el interior del agujero.

El carácter unidireccional de esa frontera no supone un problema en sí mismo: de hecho, es una predicción sólida de la relatividad general. Las dificultades comienzan cuando esta teoría interactúa con el extraño mundo de la mecánica cuántica.

EN SÍNTESIS

Los agujeros negros emiten radiación y se evaporan, un proceso donde parece perderse la información sobre lo que cayó en el agujero. Pero las leyes cuánticas no permiten destruir la información.

Esa paradoja podría resolverse si los interiores de dos agujeros negros distintos estuvieran conectados por agujeros de gusano, hipotéticos túneles entre regiones alejadas del espaciotiempo.

Los agujeros de gusano permitirían intercambiar las regiones interiores o «islas» de los dos agujeros negros. De este modo, la información contenida en una isla podría escapar al exterior.

Algo a partir de nada

La teoría cuántica redime a los agujeros negros de ser los monstruosos tragaldabas que aparentan. Y es que acaban retornando cada caloría que consumen en forma de radiación de Hawking, una energía que extraen del espacio vacío cercano a su horizonte de sucesos.

La idea de sacar algo de la nada puede sonar absurda, pero «absurda» no es lo peor que se ha dicho de la mecánica cuántica. El vacío de la teoría cuántica oculta un mar de partículas (como fotones, electrones o gravitones) que conspiran para hacer que el espacio vacío parezca desocupado. Esas partículas aparecen en parejas cuidadosamente dispuestas y constituyen el pegamento que mantiene unido el espaciotiempo.

Pero cuando el horizonte de sucesos de un agujero negro se interpone entre las dos partículas de un par, estas quedan separadas para siempre. Las partículas se alejan del horizonte en direcciones opuestas, de modo que una termina en la singularidad y la otra escapa de la atracción gravitatoria del agujero, convertida en radiación de Hawking. Ese proceso consume el agujero negro, que se va tornando más ligero y pequeño conforme pierde la energía que se llevan las partículas salientes. Dado que la energía ha de conservarse, las partículas que quedan atrapadas en el interior deben tener energía negativa, lo cual explica la disminución neta de la masa del agujero negro.

Desde fuera, el agujero negro parece disiparse, aunque de un modo tan lento que, en la práctica, resulta imperceptible. Si quemamos un libro, las palabras escritas en sus páginas dejan una huella en el patrón de la luz emitida y en las cenizas que restan. Por lo tanto, esa información se preserva, al menos en principio. Si un agujero negro en

evaporación fuera un sistema normal, como un libro que arde, la información sobre todo lo que ha caído en él quedaría codificada en la radiación de Hawking que emite. Por desgracia, la situación se ve complicada por la relación cuántica que existe entre las partículas situadas a ambos lados del horizonte de sucesos.

Relación a distancia

El problema comienza al romperse la unión entre las dos partículas que quedan a ambos lados del horizonte. Pese a estar separadas, esas partículas mantienen un vínculo cuántico que trasciende el espacio y el tiempo: están conectadas por el entrelazamiento. Tildado de absurdo por los físicos que lo predijeron, el entrelazamiento cuántico es quizás uno de los aspectos más insólitos de nuestro universo, y seguramente uno de los más esenciales. El concepto lo formularon Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen como una refutación a la incipiente mecánica cuántica. Esos autores recurrieron al entrelazamiento para argüir que la teoría debía ser incompleta: «fantasmal» es el célebre término que Einstein empleó para referirse al fenómeno [*véase* «Acción fantasmal», por Ronald Hanson y Krister Shalm; Investigación y Ciencia, febrero de 2019].

La idea de sacar algo de la nada puede sonar absurda, pero «absurda» no es lo peor que se ha dicho de la mecánica cuántica

Un ejemplo sencillo de entrelazamiento vendría dado por dos monedas en una superposición (el fenómeno cuántico por el que un sistema posee varios estados posibles hasta que se efectúa una medición) en la que puede que ambas sean cara o que ambas sean cruz. La superposición no implica que las monedas muestren la cara y la cruz al mismo tiempo (algo físicamente imposible), sino que la probabilidad de ver que ambas monedas son cara, o que ambas son cruz, es 1/2. No hay ninguna opción de hallar las dos monedas con orientaciones opuestas. Así pues, esas monedas están entrelazadas: observar una nos permite predecir con total seguridad el resultado que obtendríamos al examinar la otra. Cada una de las monedas por separado es aleatoria y, por tanto, no contiene información, pero la aleatoriedad del par está correlacionada a la perfección.

A los científicos les desconcertaba el modo en que las dos monedas (siguiendo con el ejemplo anterior) parecían influirse mutuamente sin necesidad de entrar en contacto físico. Aun si estuvieran en distintas galaxias, mantendrían la misma cantidad de entrelazamiento entre ellas. A Einstein le incomodaba la aparente «acción fantasmal a distancia» que conectaba los resultados de dos medidas aleatorias distintas.

Lo irónico es que, por decirlo de algún modo, el propio Einstein se hallaba en una superposición de acertar y equivocarse. Estaba en lo cierto al reconocer la importancia del entrelazamiento como elemento distintivo de la mecánica cuántica frente a la física clásica. Su error se resume en la perogrullada de que «correlación no implica causalidad»: aunque los destinos de ambas monedas estén vinculados de forma inextricable, el resultado obtenido al observar una de ellas no causa el que se encuentra al medir la otra. Lo que sucede es que la mecánica cuántica permite un grado de correlación más alto del que estamos acostumbrados.

Información perdida

Como la radiación de Hawking está compuesta por la mitad de un conjunto de pares entrelazados, emerge del agujero negro en un estado completamente aleatorio: si fueran monedas, las veríamos mostrar cara o cruz con la misma probabilidad. Por ello, medir la radiación de Hawking no nos permitiría inferir nada útil acerca del contenido del agujero. Eso significa que un agujero negro que se evapora es, en esencia, un mero destructor de información, solo que, a diferencia de las trituradoras de documentos, lleva a cabo un trabajo exhaustivo.

Para medir la falta de información (o la aleatoriedad) de la radiación de Hawking, podemos pensar en la cantidad de entrelazamiento que existe entre la radiación y el agujero negro. Eso se debe a que uno de los miembros del par entrelazado es siempre aleatorio, y los integrantes del exterior son todo lo que queda tras la evaporación. La medida de la aleatoriedad recibe mu-

La paradoja de la información

Los físicos llevan casi medio siglo preguntándose qué ocurre con los objetos que caen en un agujero negro. Si, como parece predecir la teoría, los agujeros negros destruyen la información acerca de lo que ha caído en ellos, nuestras teorías sobre la naturaleza sufrirían graves problemas fundamentales. Sin embargo, recientemente se han hecho progresos que podrían resolver por fin este misterio.

En 1974, Stephen Hawking comprendió que los agujeros negros se evaporan.

Como si fuera un charco al sol, un agujero negro va menguando lentamente, partícula a partícula, hasta desaparecer por completo.

La física cuántica predice que el espacio vacío no está realmente vacío.

En cambio, de él no dejan de surgir pares de partículas «virtuales».

Partículas virtuales

Horizonte de sucesos

Agujero negro

Las partículas de un par se aniquilan entre sí, salvo que cada una aparezca en un lado distinto del horizonte de sucesos, la frontera del agujero negro.

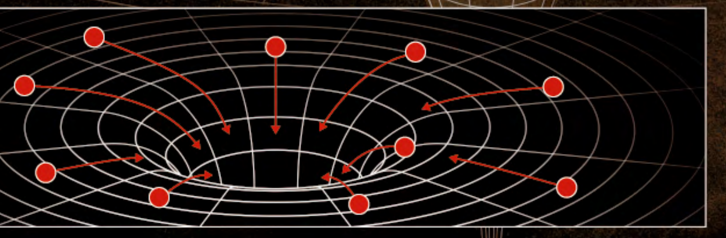
Radiación entrante

En ese caso, una de las partículas del par puede quedar atrapada dentro del horizonte...

Radiación saliente

... mientras la otra escapa y se lleva consigo energía.

Distorsión gravitatoria del espacio



Esa pérdida de energía acaba haciendo que el agujero negro se consuma.

Pero si los agujeros negros pueden desaparecer, lo mismo ocurre con toda la información sobre lo que cayó en ellos.

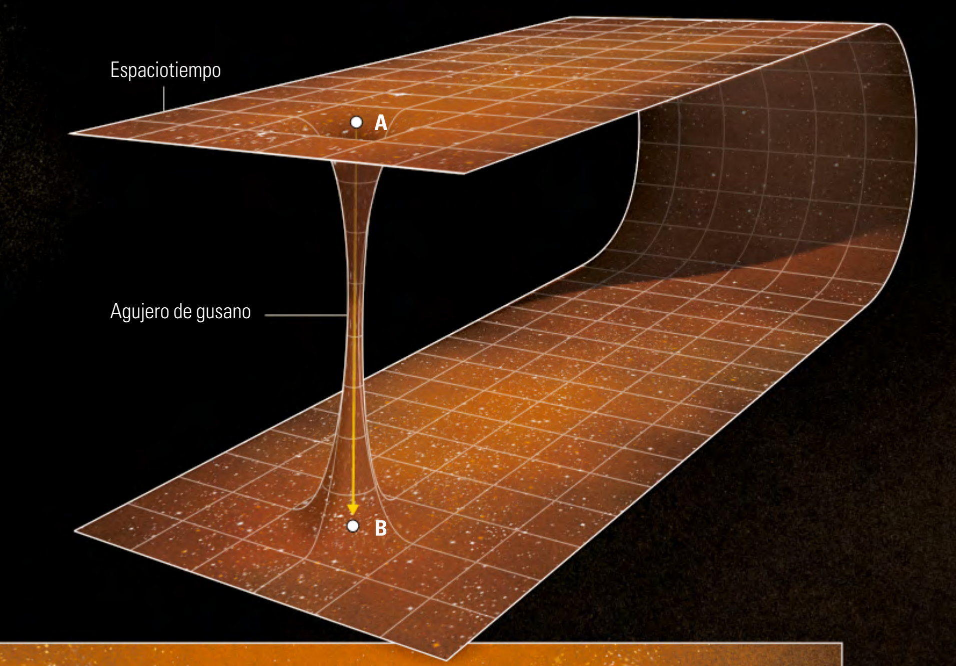
Singularidad

Eso parece violar una ley física fundamental, que afirma que la información no puede destruirse.

He aquí la paradoja.

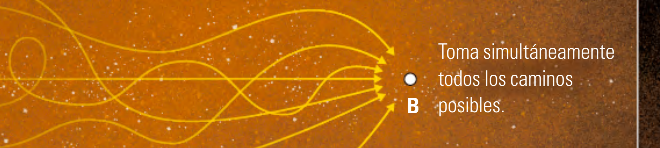
Los agujeros de gusano ofrecen una posible solución.

Esos agujeros son hipotéticos «túneles» que conectarían dos puntos distantes del espaciotiempo a través de un atajo.



Los interiores de dos agujeros negros podrían estar conectados por un agujero de gusano.

Aunque es raro, en teoría es posible.



Y según la física cuántica, todo lo que puede suceder, sucede.

Una partícula no viaja del punto *A* al *B* siguiendo una trayectoria concreta.

A

B

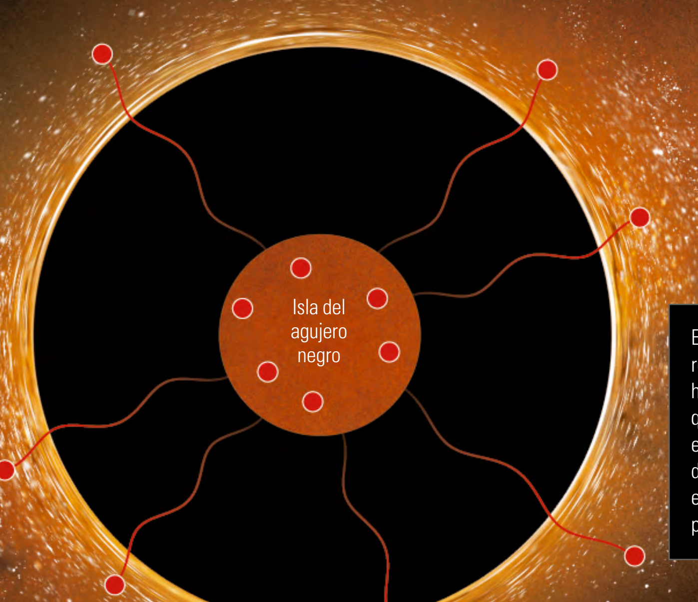
Toma simultáneamente todos los caminos posibles.

Si hay agujeros de gusano en el centro de los agujeros negros, puede que la información que cae en ellos no se destruya.

El interior de los agujeros negros parece contener una región especial, denominada «isla».

La isla estaría a la vez dentro y fuera del agujero negro, como si formase parte de la radiación saliente que los va consumiendo.

Y si la isla escapa, también lo hace la información que contiene.



Estas nuevas ideas resultan muy confusas hasta para los físicos, que están viendo que el cosmos y la naturaleza de la realidad son más extraños de lo que pensaban.

MATTHEW TWOMBLY

chos nombres, entre ellos «entropía de entrelazamiento», y crece con cada partícula de Hawking emitida, estabilizándose en un valor elevado una vez que ha desaprecido el agujero negro.

Ese patrón difiere de lo que ocurre cuando se preserva la información, como en el ejemplo del libro quemado. En un caso así, la entropía puede aumentar al principio, pero acaba alcanzando un pico y cae a cero al final del proceso. Tal comportamiento resulta intuitivo si pensamos en un mazo de cartas. Si repartimos uno a uno y boca abajo los 52 naipes de una baraja francesa, la entropía de las cartas presentes sobre la mesa no es más que una medida de nuestra ignorancia respecto a lo que esconden al otro lado. En concreto, cuantifica las distintas combinaciones de cartas que podríamos tener.

Así, si solo tuviéramos una carta, la entropía sería 52, porque hay 52 posibilidades. Conforme vayamos repartiendo más naipes, la entropía crecerá, hasta alcanzar un máximo de 500 billones para 26 cartas, lo que corresponde a los 500 billones de posibles combinaciones. A partir de ahí, sin embargo, el número de opciones (y con él la entropía) comienza a reducirse, hasta tornarse de nuevo 52 cuando haya 51 cartas boca abajo. Una vez que todos los naipes estén sobre el tapete, sabremos con certeza cuáles son (la baraja completa) y la entropía será cero. Este aumento y posterior disminución de la entropía, conocido como curva de Page, se satisface en todos los sistemas cuánticos normales. El tiempo que tarda la entropía en alcanzar su máximo y empezar a caer se llama tiempo de Page.

La desaparición de la información en el interior de los agujeros negros sería desastrosa para la física, ya que las leyes de la mecánica cuántica estipulan que la información no puede destruirse. En eso consiste la famosa paradoja de la información, en el hecho de que añadir un toque cuántico a la descripción de los agujeros negros conduce a una contradicción aparentemente insuperable. Los físicos eran conscientes de que necesitaban una comprensión más completa de la gravedad cuántica para generar la curva de Page de la radiación de Hawking. Y, como cabía esperar, no resultó tarea fácil.

Un horizonte lleno de sucesos

Parte del reto radicaba en que una pequeña modificación del proceso de evaporación no bastaba para generar la curva de Page y conseguir que la entropía volviese a cero. Lo que hacía falta era una reformulación drástica de la estructura de los agujeros negros.

En un artículo que publiqué en 2013 junto a Donald Marolf, Joseph Polchinski y Jamie Sully (un equipo conocido como AMPS, por nuestras iniciales), exploramos diversas formas de modificar nuestra imagen de los agujeros negros en evaporación mediante una serie de experimentos mentales, el tipo de ejercicios intelectuales que popularizó Einstein. Gracias a ellos concluimos que, para salvaguardar la inviolabilidad de la información, había que renunciar a algo: o bien la física era no local (permitiendo que la información se desvaneciera en el interior para aparecer al instante fuera del horizonte de sucesos), o bien debía entrar en juego algún nuevo proceso al alcanzarse el tiempo de Page. Para evitar el aumento de la entropía, ese proceso tendría que romper el entrelazamiento entre las partículas situadas a ambos lados del horizonte. La primera vía, hacer la física no local, parecía demasiado radical, así que optamos por la segunda.

Las paradojas de la información y del muro de fuego surgían porque nuestros intentos de unir la mecánica cuántica y la física de los agujeros negros eran demasiado tímidos

Aunque esa modificación ayuda a preservar la información, plantea otra paradoja. Recordemos que el entrelazamiento a través del horizonte es una consecuencia del espacio vacío presente en esa región, y del modo en que el vacío se sustenta en un mar de pares de partículas entrelazadas. El entrelazamiento es esencial, y romperlo supone crear una pared de partículas con energías extremadamente altas, algo que en nuestro tra-

bajo llamamos un muro de fuego. Tener ese muro en el horizonte impediría que nada entrara en el agujero negro, ya que la materia que se precipitase sobre él quedaría vaporizada al tocarlo. En el tiempo de Page, el agujero negro perdería de repente su interior, y el espaciotiempo llegaría a su fin en el horizonte de sucesos, en vez de en la singularidad central del agujero negro. Esta conclusión se conoce como la paradoja del muro de fuego, un callejón sin salida que implica que cualquier solución a la paradoja de la información viene a costa de pulverizar lo que sabemos acerca de los agujeros negros. Era un atolladero de padre y muy señor mío.

Agujeros de gusano fluctuantes

Al final, mis colegas y yo caímos en la cuenta de que tanto la paradoja de la información como la más reciente de los muros de fuego surgían porque nuestros intentos de unir la mecánica cuántica y la física de los agujeros negros eran demasiado tímidos. No bastaba con aplicar la mecánica cuántica a la materia presente en un agujero negro, también debíamos idear un tratamiento cuántico para el espaciotiempo del agujero. Aunque los efectos cuánticos sobre el espaciotiempo suelen ser muy pequeños, podrían verse amplificados por la gran cantidad de entrelazamiento producida en la evaporación. Tales efectos serían sutiles, pero tendrían enormes implicaciones.

Una región del interior del agujero negro, la isla, es en realidad parte del exterior y forma una unidad con la radiación de Hawking saliente

Para considerar la naturaleza cuántica del espaciotiempo, utilizamos la integral de camino, una técnica inventada por Richard Feynman. La idea se basa en el extraño hecho de que, según la teoría cuántica, las partículas no viajan del punto *A* al punto *B* siguiendo una única trayectoria, sino que lo hacen a través de todas las posibles rutas que unen ambos puntos. La integral de camino es una manera de describir el viaje de la partícula a partir de la superposición cuántica de todas las trayectorias posibles. De igual modo, un espaciotiempo cuántico puede estar en una superposición de varias formas complejas que evolucionan de diferentes maneras. Por ejemplo, si empezamos y acabamos con dos agujeros negros ordinarios, hay una probabilidad no nula de que el espaciotiempo cuántico cree un agujero de gusano efímero que conecte sus interiores.

Por lo general, la probabilidad de que suceda eso es despreciable. Sin embargo, al calcular la integral de camino en presencia de la radiación de Hawking de varios agujeros negros, hallamos que la gran cantidad de entrelazamiento entre la radiación y sus interiores hace más probable que surjan tales agujeros de gusano. Esta idea fue fruto del trabajo que realicé en 2019 con Thomas Hartman, Juan Maldacena, Edgar Shaghoulian y Amirhossein Tajdini. Y una colaboración independiente formada por Geoffrey Penington, Stephen Shenker, Douglas Stanford y Zhenbin Yang llegó a la misma conclusión.

Islas más allá del horizonte

¿Por qué es importante que algunos agujeros negros estén conectados por agujeros de gusano? Resulta que estos modifican la cantidad de entropía de entrelazamiento que existe entre un agujero negro y su radiación de Hawking. La clave reside en medir dicha entropía en presencia de varias copias del sistema, algo que se conoce como el «truco de la réplica».

El efecto físico relevante que producen esos efímeros agujeros de gusano es el de intercambiar los interiores de los distintos agujeros negros. Esto ocurre de manera literal: lo que estaba en uno de los agujeros negros se ve empujado a otra copia lejana y asume el espaciotiempo interno de un agujero negro diferente. La región intercambiada se llama «isla» y comprende casi todo el interior del agujero negro, hasta el horizonte de sucesos.

Y ese intercambio es justo lo que necesitábamos. Si nos centramos en uno de los agujeros negros, al intercambiar la isla, esta se lleva consigo todas las partículas entrelazadas con la radiación de Hawking, por lo que técnicamente ya no existe entrelazamiento entre el agujero negro y su radiación.

Al incluir el posible efecto de los agujeros de gusano, obtenemos una nueva fórmula para la entropía de entrelazamiento de la radiación aplicada a una única copia del sistema. En contraste con el cálculo original de Hawking, que simplemente contaba el número de partículas emitidas por el agujero negro, la nueva expresión trata la isla como si estuviera en el exterior del agujero y formase parte de la radiación de Hawking. En consecuencia, el entrelazamiento entre la isla y el exterior no contribuye a la entropía, que proviene casi en exclusiva de la probabilidad de que se produzca el intercambio. Dicha probabilidad es igual al área de la frontera de la isla (que coincide aproximadamente con la del horizonte de sucesos) dividida por la constante de Newton, y decrece a medida que mengua el agujero negro. Esta es la «fórmula de la isla» para la entropía de entrelazamiento de la radiación de Hawking.

El último paso para hallar la entropía consiste en tomar el valor mínimo entre los proporcionados por la fórmula de la isla y el cálculo original de Hawking. Y eso nos da la curva de Page que estábamos buscando. Al principio, calculamos la entropía de entrelazamiento de la radiación mediante la fórmula de Hawking, porque se obtiene un valor más pequeño que al emplear el área del horizonte de sucesos del agujero negro. Pero esa área disminuye a medida que se evapora el agujero negro y, a partir de cierto instante, es la nueva fórmula la que caracteriza correctamente la entropía de entrelazamiento.

Lo más notable de ese resultado es que resuelve dos paradojas con una sola fórmula. Por un lado, parece dar cuenta de la paradoja del muro de fuego, al señalar la existencia de los efectos no locales que mi grupo AMPS había descartado en un primer momento. En vez de romper el entrelazamiento en el horizonte, nos conmina a tratar el interior (la isla) como parte del exterior. Y la fórmula también soluciona la paradoja de la información, al revelar el modo en que el agujero negro genera la curva de Page y preserva la información.

Echemos la vista atrás y repasemos cómo hemos llegado hasta aquí. El origen de la paradoja de la información se halla en la incompatibilidad entre la captura de la información que atraviesa el horizonte de sucesos y la exigencia cuántica de que dicha información salga del agujero negro. Las soluciones más simples conducían a modificaciones drásticas de la estructura del agujero negro. Sin embargo, los sutiles efectos de los agujeros de gusano fluctuantes cambian el panorama por completo. El resultado es una imagen coherente que permite al agujero negro conservar la estructura predicha por la relatividad general, si bien en presencia de una no localidad implícita pero potente. Esa no localidad nos exhorta a considerar que una región del interior del agujero negro, la isla, es parte del exterior y forma una unidad con la radiación saliente. Así, la información no escapa del agujero negro atravesando el infranqueable horizonte de sucesos, sino cayendo en el interior de la isla.

Aunque se trata de un desarrollo emocionante, solo hemos comenzado a explorar las implicaciones de los agujeros de gusano y de la fórmula de la isla. Curiosamente, a pesar de que esos elementos garantizan que la isla se transfiere a la radiación de Hawking, no generan predicciones concretas para mediciones específicas de esta última. Lo que nos enseñan es que los agujeros de gusano son el ingrediente que faltaba en la estimación original de Hawking de la aleatoriedad de la radiación, y que la gravedad es lo bastante «hábil» como para ajustarse a la mecánica cuántica. A través de esos agujeros de gusano, la gravedad aprovecha el poder del entrelazamiento para generar no localidad, y eso nos resulta tan desconcertante como el entrelazamiento lo fue para Einstein. Debemos admitir que, en cierto sentido, Einstein tenía razón después de todo.

Ahmed Almheiri es físico teórico en la Universidad de Nueva York en Abu Dabi, donde estudia las conexiones entre la información y la gravedad cuánticas.



PARA SABER MÁS

The entropy of Hawking radiation. Ahmed Almheiri et al. en *Reviews of Modern Physics*, vol. 93, art. 035002, julio de 2021.

Lessons from the information paradox. Suvrat Raju en *Physics Reports*, vol. 943, págs. 1-80, enero de 2022.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los agujeros negros y la paradoja de la información. Leonard Susskind en *IyC*, junio de 1997.

Agujeros negros y muros de fuego. Joseph Polchinski en *IyC*, abril de 2015.

Geometría y entrelazamiento cuántico. Juan Maldacena en *IyC*, noviembre de 2015.

Cómo fugarse de un agujero negro. Steven B. Giddings en *IyC*, febrero de 2020.

La paradoja más famosa de la física se acerca a su fin. George Musser en *IyC*, febrero de 2021.

INFORME ESPECIAL

HALLAZGOS SOBRE AGUJEROS NEGROS

COSMOLOGÍA

HISTORIA DE DOS HORIZONTES

Edgar Shaghoulian | Los nuevos descubrimientos sobre los agujeros negros podrían ayudarnos a entender mejor el universo en su conjunto

KENN BROWN

¿De dónde viene el universo? ¿Hacia dónde se encamina? Responder a estas preguntas exige entender la física a dos escalas radicalmente distintas: la cosmológica, referida a los supercúmulos de galaxias o al universo en su conjunto, y la cuántica, correspondiente al mundo antiintuitivo de los átomos y sus núcleos.

No obstante, para gran parte de lo que nos gustaría saber sobre el universo, basta con la cosmología clásica. Este campo se basa en la relatividad general de Einstein, que describe la gravedad sin ocuparse de los aspectos cuánticos. Pero hay algunos momentos especiales en la historia del cosmos (como su infancia, cuando todo él tenía el tamaño de un átomo) donde no es posible ignorar la física a escalas pequeñas. Para comprender esas épocas, necesitamos una teoría cuántica de la gravedad que sea aplicable tanto a los electrones de un átomo como al movimiento de la Tierra en torno al Sol. El objetivo de la cosmología cuántica es desarrollar esa teoría y utilizarla para estudiar el universo.

La cosmología cuántica no es para pusilánimes. Es el salvaje Oeste de la física teórica, con apenas un puñado de hechos observacionales y pistas para guiarnos. Su alcance y dificultad han constituido cantos de sirena para muchos físicos jóvenes y ambiciosos, atrayéndolos y haciéndolos naufragar sin remedio. Pero hay una sensación palpable de que esta vez será diferente y de que los recientes avances en la física de los agujeros negros (que también requirieron entender un régimen donde la mecánica cuántica y la gravedad son igual de importantes) nos podrían ayudar a responder algunas preguntas de la cosmología cuántica. Ese optimismo se respiraba en una conferencia virtual en la que participé hace poco y que acogió un coloquio dedicado a la intersección entre esos dos campos. No esperaba demasiada asistencia y, sin embargo, muchos grandes nombres de la física estaban allí, llenos de ideas y listos para ponerse a trabajar.

EN SÍNTESIS

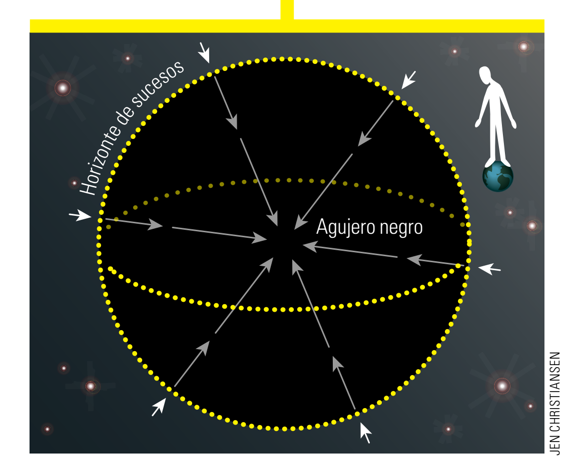
El universo presenta ciertas semejanzas con un agujero negro. Por ejemplo, ambos poseen un horizonte de sucesos, una superficie «de no retorno» que emite materia y radiación.

Por ello, los avances relacionados con la paradoja de la información en los agujeros negros podrían allanar el camino para desarrollar una teoría cuántica de la gravedad aplicable a todo el cosmos.

En particular, dichos avances prometen una comprensión más completa del principio holográfico, según el cual la gravedad cuántica podría formularse como una teoría no gravitatoria en menos dimensiones.

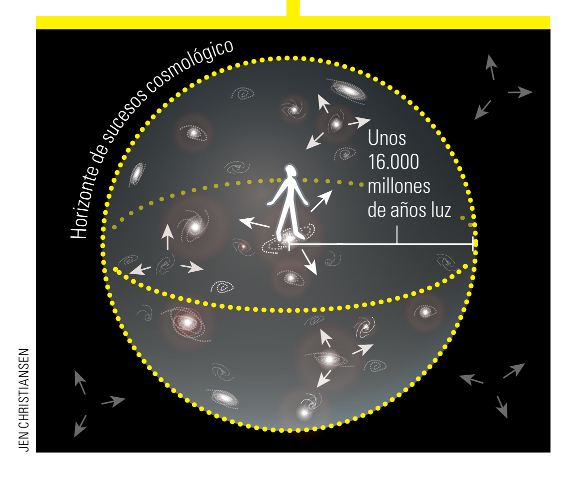
Horizontes de sucesos

El primer indicio de que existe una relación entre los agujeros negros y el universo en su conjunto es que ambos presentan «horizontes de sucesos», superficies de no retorno más allá de las cuales dos personas parecen perder el contacto para siempre. La atracción gravitatoria de un agujero negro es tan fuerte que, a distancias menores a cierto umbral, ni siquiera la luz (que viaja a la máxima velocidad posible) es capaz de escapar. Esa frontera a partir de la cual la luz queda atrapada constituye un horizonte de sucesos esférico en torno al centro del agujero negro.



Nuestro universo también posee un horizonte de sucesos, como confirmó en 1998 el inesperado descubrimiento de que el espacio no solo se expande, sino que lo hace de forma acelerada [*véase* «Cuando la aceleración cambió de signo», por Adam G. Riess y Michael S. Turner; Investigación y Ciencia, abril de 2004]. Esa aceleración, cuya causa desconocida recibe el nombre de «energía oscura», atrapa la luz igual que los agujeros negros: a medida que se expande el cosmos, la repulsión entre las distintas regiones del espacio es tan fuerte que, a partir de cierta distancia, ni siquiera la luz puede viajar entre ellas. Eso da lugar a un horizonte de sucesos cosmológico alrededor nuestro, una superficie esférica que deja sumido en la oscuridad todo lo

que hay más allá. Pero existe una diferencia crucial entre el horizonte de sucesos cosmológico y los de los agujeros negros. En un agujero negro, el espaciotiempo se precipita hacia un punto: la singularidad. En el caso cosmológico no hay puntos especiales: todo el espacio se expande de manera uniforme, como la superficie de un globo que se infla. Eso significa que las galaxias lejanas tienen sus propios horizontes de sucesos, que las rodean a ellas en lugar de a nosotros. En la actualidad, nuestro horizonte de sucesos cosmológico está a unos 16.000 millones de años luz. En tanto



JEN CHRISTIANSEN

continúe la aceleración, ninguna señal luminosa que se emita hoy desde una distancia superior a esa podrá alcanzarnos jamás. (Los cosmólogos también hablan de «horizontes de partículas» y a menudo se refieren a ellos como horizontes cosmológicos, lo cual puede crear cierta confusión. El horizonte de partículas alude a la distancia más allá de la cual una señal luminosa emitida en el universo temprano aún no ha tenido tiempo de alcanzar la Tierra. Aquí nos ocuparemos solo del horizonte de sucesos cosmológico, al que a veces llamaremos simplemente horizonte cosmológico y que solo existe en universos que aceleran, como el nuestro.)

Las semejanzas entre los agujeros negros y nuestro universo no acaban ahí. En 1974, Stephen Hawking mostró que los agujeros negros no son totalmente negros: debido a los efectos cuánticos, tienen una temperatura y, en consecuencia, emiten materia y radiación, como cualquier cuerpo caliente [*véase* «La mecánica cuántica de los agujeros negros», por Stephen Hawking; Investigación y Ciencia, marzo de 1977]. Dicha emisión, conocida como radiación de Hawking, hace que los agujeros negros se evaporen y acaben desapareciendo. Y resulta que los horizontes cosmológicos también tienen temperatura y emiten materia y radiación debido a un efecto muy similar. Pero, como los horizontes cosmológicos están alrededor nuestro y su radiación cae hacia el interior, reabsorben sus propias emisiones y no se evaporan como los agujeros negros.

El hallazgo de Hawking planteó un grave problema: si los agujeros negros pueden desaparecer, también lo hará la información contenida en ellos, lo cual violaría las leyes de la mecánica cuántica. Esta es la famosa paradoja de la información en los agujeros negros, un misterio profundo que complica los esfuerzos por combinar la mecánica cuántica y la gravedad. Pero en 2019 se produjeron enormes avances en este sentido: gracias a una confluencia de desarrollos conceptuales y técnicos, los físicos argumentaron que la información que cae en el interior de un agujero negro está codificada en la radiación de Hawking que escapa de él [*véase* «Agujeros negros, agujeros de gusano y entrelazamiento», por Ahmed Almheiri, *en este mismo número*].

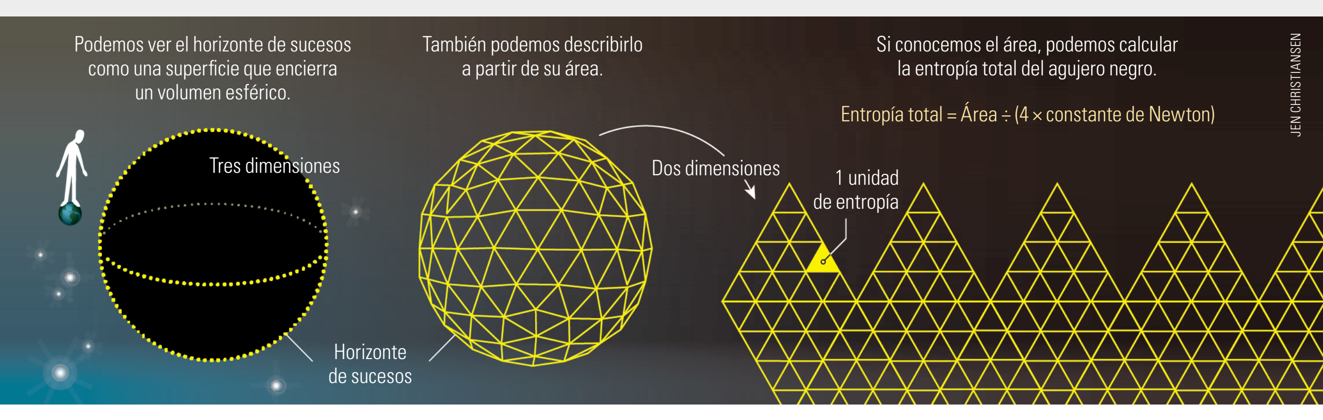
Ese descubrimiento supone un gran estímulo para quienes estudiamos la cosmología cuántica. Dadas las semejanzas matemáticas entre los horizontes de sucesos de los agujeros negros y los cosmológicos, muchos creemos que no es posible entender los segundos sin comprender antes los primeros. Así, los agujeros negros se convirtieron para nosotros en un problema «para entrar en calor», uno de los más difíciles de todos los tiempos. Aún no lo hemos resuelto del todo, pero ahora disponemos de un conjunto de herramientas que arrojan luz sobre la interacción entre la gravedad y la mecánica cuántica en presencia de agujeros negros.

Entropía y principio holográfico

Parte del progreso reciente en la paradoja de la información emana del principio holográfico, una idea propuesta en los años noventa por Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht, y Leonard Susskind, de la Universidad Stanford. Dicho principio sostiene que la teoría cuántica de la gravedad no debería formularse en las tres dimensiones espaciales que emplean todas las demás teorías físicas, sino en dos, como las de una hoja de papel. El principal argumento es muy simple: los agujeros negros poseen una entropía (una medida de cuánta información pueden contener) que es proporcional al área bidimensional de su horizonte de sucesos.

El principio holográfico

Un concepto importante para comprender los agujeros negros es el principio holográfico. Este afirma que la teoría cuántica de la gravedad debería poder formularse en dos dimensiones espaciales (como las del horizonte de sucesos de los agujeros negros) en lugar de tres (las del volumen que encierra ese horizonte). La razón tiene que ver con la entropía de los agujeros negros, que es una medida de la cantidad de información que pueden almacenar y que resulta depender del área del agujero negro, no de su volumen.



Podemos comparar ese comportamiento con el de la entropía de un sistema más habitual, como un gas encerrado en una caja. En ese caso, la entropía es proporcional al volumen tridimensional de la caja, no a su área. Y eso resulta natural: la caja puede contener algo en cada punto de su interior, así que, si aumenta el volumen, también lo hará la entropía. Pero, en los agujeros negros, debido a la curvatura del espacio, el volumen puede aumentar sin que cambie el área del horizonte, y esa variación no afectará a la entropía. Aunque a primera vista parezca que tenemos las tres dimensiones espaciales para almacenar información en un agujero negro, la fórmula de la entropía muestra que solo podemos jugar con dos de ellas, las del área del horizonte. Y eso nos lleva al principio holográfico: para que cuadren las entropías, la gravedad cuántica debería poder formularse como una teoría cuántica no gravitatoria en menos dimensiones.

La idea de que el espacio quizá no sea realmente tridimensional resulta bastante atractiva desde el punto de vista filosófico. Al menos una de sus dimensiones podría ser un fenómeno emergente, en vez de estar establecida de manera explícita en las leyes fundamentales. Los físicos piensan ahora que el espacio podría emerger a partir del comportamiento colectivo de un gran número de constituyentes simples, igual que la consciencia parece surgir del comportamiento colectivo de las neuronas [*véase* «El origen del espacio y del tiempo», por Adam Becker; Investigación y Ciencia, mayo de 2022].

Uno de los aspectos más atractivos de los desarrollos recientes en la paradoja de la información es que apuntan a una comprensión más general del principio holográfico, que hasta ahora solo se había podido formular con precisión en situaciones muy alejadas de la realidad. Sin embargo, los cálculos de 2019 muestran que la manera en que la información contenida en un agujero negro queda codificada en la radiación de Hawking es matemáticamente análoga al modo en que, según el principio holográfico, un sistema gravitatorio queda codificado en otro no gravitatorio de dimensión menor. Y esas técnicas pueden emplearse en contextos más parecidos a nuestro universo, lo que abre la puerta a entender el principio holográfico en el mundo real. Una propiedad notable de los horizontes cosmológicos es que también poseen una entropía, dada justo por la misma fórmula que usamos para los agujeros negros. La interpretación física de esta entropía es bastante menos evidente, y muchos esperamos que aplicar las nuevas técnicas a nuestro universo nos ayude a desvelar el misterio. Si la entropía mide cuánta información cabe más allá del horizonte, como en los agujeros negros, entonces tendremos un límite estricto para la cantidad de información que puede almacenar nuestro universo.

Observadores externos

Los últimos avances en la paradoja de la información sugieren que, si captáramos toda la radiación de un agujero negro que se evapora, tendríamos acceso a la información que cayó en él. Una de las

preguntas conceptuales más importantes en cosmología es si ocurre lo mismo con los horizontes de sucesos cosmológicos. Creemos que también emiten radiación, igual que los agujeros negros, así que ¿podríamos usarla para acceder a lo que está más allá de nuestro horizonte cosmológico? ¿Hay alguna otra forma de ver más allá del horizonte? Si no es así, la mayor parte de nuestro vasto y rico universo acabará perdiéndose para siempre. Es una imagen ciertamente sombría de nuestro futuro: nos quedaremos a oscuras.

En casi todos los intentos de abordar esa pregunta, los físicos se han visto forzados a imaginar una situación artificial en la que escapan del universo acelerado y lo ven desde el exterior. Se trata de una simplificación crucial que imita lo que ocurre en un agujero negro, donde podemos separar el sistema y el observador con solo suponer que este se halla lejos del agujero. Pero nuestro horizonte cosmológico no parece ofrecer escapatoria: nos rodea y se mueve si nos movemos, y eso complica mucho el problema. Aun así, si queremos aplicar a la cosmología las nuevas herramientas adquiridas en el estudio de los agujeros negros, debemos hallar el modo de contemplar el horizonte cosmológico desde fuera.

Hay varias maneras de lograr esa visión externa. Una de las más sencillas es considerar un hipotético universo auxiliar que esté entrelazado cuánticamente con el nuestro e investigar si un observador de ese universo tendría acceso a la información contenida en nuestro cosmos, que estaría más allá de su horizonte. En un trabajo que realicé con Thomas Hartman y Yikun Jiang, ambos de la Universidad Cornell, construimos ejemplos de universos auxiliares y otros escenarios, y mostramos que el observador puede acceder a la información que se encuentra más allá de su horizonte cosmológico de la misma forma en que es posible acceder a la información contenida en un agujero negro. Otro artículo de Yiming Chen, de la Universidad de Princeton, Victor Gorbenko, de la Escuela Politécnica Federal de Lausana, y Juan Maldacena, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (IAS, por sus siglas en inglés), presentó resultados similares.

Pero todos estos análisis tienen un defecto importante: al investigar «nuestro» cosmos, empleamos un universo modelo que se contrae, en vez de expandirse. Tales universos son mucho más fáciles de describir en el contexto de la cosmología cuántica. Aunque no acabamos de entender el motivo, tiene que ver con el hecho de que el interior de un agujero negro puede verse como un universo en contracción donde todo se acerca y comprime. Así, nuestra nueva comprensión de los agujeros negros puede ayudarnos a estudiar ese tipo de universos.

E incluso en esas situaciones simplificadas aparecen problemas. Uno de ellos es que resulta sencillo construir diversos observadores externos con acceso simultáneo a la información del universo en contracción. Eso implica que varias personas pueden llegar a la misma información y manipularla por separado, pero la mecánica cuántica es estricta en ese sentido: no solo prohíbe destruir la información cuántica, sino también reproducirla. Este resultado se conoce como el teorema de la no clonación, y la existencia de múltiples observadores externos parece violarlo. En un agujero negro, nada de esto supone un problema porque, aunque también puede haber muchos observadores externos, no pueden acceder por separado a la misma información del interior, lo cual está relacionado con el hecho de que solo hay un horizonte de sucesos. Sin embargo, en el caso cosmológico, cada observador tiene un horizonte distinto. No obstante, un estudio reciente que llevé a cabo con Adam Levine, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, sugiere que las mismas herramientas desarrolladas en el contexto de los agujeros negros sirven para evitar esta incongruencia.

Hacia una teoría completa

Aunque se han producido avances apasionantes, aún no hemos podido aplicar lo que hemos aprendido sobre los horizontes de los agujeros negros al horizonte cosmológico de nuestro universo, debido a las diferencias existentes entre ambos.

¿Cuál es nuestro objetivo último? Librarnos de observadores externos, universos que se contraen y otro tipo de rodeos: queremos una teoría cuántica completa de nuestro universo en expansión, descrito desde nuestra atalaya en el centro de la vorágine. Muchos físicos creen que nuestra mejor baza es buscar una descripción holográfica, es decir, una que emplee menos dimensiones del espacio que las tres habituales. Y hay dos formas de intentarlo.

La primera es emplear las herramientas de la teoría de cuerdas, que trata las partículas elementales como cuerdas vibrantes [*véase* «El paisaje de la teoría de cuerdas», por Raphael Bousso y Joseph Polchinski; Investigación y Ciencia, noviembre de 2004]. Si la configuramos justo de la

manera adecuada, esa teoría nos permite dar una descripción holográfica de algunos horizontes de agujeros negros, y la esperanza es poder hacer lo mismo con el horizonte cosmológico. Muchos físicos han puesto gran empeño en este enfoque, pero todavía no ha proporcionado un modelo completo para un universo en expansión como el nuestro.

La otra forma de dar con una descripción holográfica es pensar en las propiedades que debería tener dicha descripción. Esta estrategia es una práctica científica habitual: usar datos para construir una teoría que los reproduzca y que, además, haga nuevas predicciones. Pero en este caso hay una particularidad, y es que los propios datos también son teóricos: son cantidades que se pueden estimar de manera fiable sin necesidad de una teoría completa, igual que podemos calcular la trayectoria de una pelota de béisbol sin recurrir a la mecánica cuántica. La idea es realizar varios cálculos usando la cosmología clásica, quizá aderezada con una pizca de mecánica cuántica, pero evitando situaciones en las que esta y la gravedad sean igual de relevantes. Así obtenemos nuestros datos teóricos, entre los que se hallaría, por ejemplo, la radiación de Hawking. Y la teoría completa de la cosmología cuántica debería ser capaz de recrear esos datos teóricos en el régimen apropiado, igual que la mecánica cuántica puede reproducir la trayectoria de la pelota de béisbol (si bien de un modo mucho más complicado que la física clásica).

Los esfuerzos por obtener esos datos teóricos están liderados por un influyente físico con una dedicación excepcional a los problemas de la cosmología cuántica: Dionysios Anninos, del King's College de Londres, que lleva más de una década trabajando en el tema y ha hallado muchas pistas en pos de una descripción holográfica. Otros investigadores de todo el mundo se han sumado a esta empresa, entre ellos Edward Witten, del IAS, figura sobresaliente de la gravedad cuántica y la teoría de cuerdas pero que tiende a eludir el salvaje Oeste de la cosmología cuántica. Junto a sus colaboradores Venkatesa Chandrasekaran, del IAS, Roberto Longo, de la Universidad de Roma Tor Vergata, y Geoffrey Penington, de la Universidad de California en Berkeley, está estudiando cómo afecta el vínculo inextricable entre el observador y el horizonte cosmológico a la descripción matemática de la cosmología cuántica.

A veces somos ambiciosos e intentamos calcular datos teóricos en situaciones donde la mecánica cuántica y la gravedad son igual de importantes. En esos casos, nos vemos obligados a hacer alguna conjetura sobre el comportamiento de la teoría completa. Muchos creemos que uno de los datos teóricos más importantes tiene que ver con las características (el patrón y la cantidad) del entrelazamiento entre los constituyentes de la cosmología cuántica. Susskind y yo hicimos dos propuestas distintas para calcularlas y, durante la pandemia, intercambiamos cientos de correos electrónicos en los que discutíamos sin cesar sobre cuál era más razonable. Un trabajo previo de Eva Silverstein, de Stanford (otra física brillante con una larga trayectoria en cosmología cuántica), y sus colaboradores sugiere una tercera manera de calcular esos datos teóricos.

La naturaleza del entrelazamiento en cosmología cuántica aún está por determinar, pero parece claro que entenderla constituirá un paso clave en la búsqueda de una descripción holográfica. Necesitamos de manera imperiosa una teoría concreta y calculable de ese tipo para poder comparar sus resultados con la gran cantidad de datos teóricos que estamos acumulando. Sin tal teoría, nos quedaremos atascados en un estadio análogo al de rellenar la tabla periódica de los elementos sin la ayuda de la mecánica cuántica para explicar sus pautas.

Es muy habitual que los físicos pasemos de inmediato a pensar en la cosmología tras averiguar algo nuevo sobre los agujeros negros. Y casi siempre se repite la misma historia: salimos escaldados, pero, tras lamernos las heridas, volvemos a intentar aprender más cosas sobre los agujeros negros. Esta vez, habida cuenta de la importancia de los hallazgos recientes y del interés que está despertando la cosmología cuántica entre científicos de todo el mundo, es posible que la historia sea distinta.

Edgar Shaghoulian es físico teórico en el Centro de Cosmología de Partículas de la Universidad de Pensilvania. Su trabajo se centra en los agujeros negros y la cosmología cuántica.



EN NUESTRO ARCHIVO

La información en el universo holográfico. Jacob D. Bekenstein en *IyC*, octubre de 2003.

El espacio, ¿una ilusión? Juan Maldacena en *IyC*, enero de 2006.

¿El fin de la cosmología? Lawrence M. Krauss y Robert J. Scherrer en *IyC*, mayo de 2008.

La gravedad cuántica, camino de convertirse en ciencia. Sabine Hossenfelder en *IyC*, enero de 2017.

Primera imagen de Sagitario A*, el agujero negro supermasivo situado en el centro de la Vía Láctea, tomada por el Telescopio del Horizonte de Sucesos.

INFORME ESPECIAL

HALLAZGOS SOBRE AGUJEROS NEGROS

ASTROFÍSICA

UNA VISTA DE NUESTRO AGUJERO NEGRO

Seth Fletcher | La primera imagen del agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea abre nuevas posibilidades para comprender la naturaleza de estos misteriosos objetos

COLABORACIÓN DEL EHT

En lo más profundo de la Vía Láctea sucede algo extraño: las estrellas giran a una fracción apreciable de la velocidad de la luz en torno a lo que parece el espacio vacío. Los científicos piensan desde hace tiempo que esos movimientos estelares señalan necesariamente la presencia de un agujero negro supermasivo, pero hasta este año no se atrevían a decirlo muy alto. Por ejemplo, cuando los astrónomos Reinhard Genzel y Andrea Ghez compartieron una parte del Nobel de física de 2020, el comunicado oficial especificaba que habían recibido el galardón por «el descubrimiento de un objeto compacto supermasivo en el centro de nuestra galaxia», no por el hallazgo de un «agujero negro». Ese objeto se conoce como Sagitario A*.

EN SÍNTESIS

Los astrónomos sospechaban desde hace tiempo que el centro de la Vía Láctea albergaba un agujero negro supermasivo, Sagitario A*, debido al peculiar movimiento de las estrellas de esa región.

La confirmación definitiva llegó este año, gracias al Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT), una red de observatorios repartidos por todo el mundo que conforman un telescopio virtual del tamaño de la Tierra.

Al captar la sombra del agujero negro, una región 2,5 veces mayor que el horizonte de sucesos y de donde apenas escapa luz, el EHT ha despejado las dudas sobre la naturaleza de Sagitario A*.

Esta primavera, sin embargo, los astrónomos del Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT, por sus siglas en inglés) zanjaron la cuestión al desvelar la primera instantánea del agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea. No era la primera fotografía de un agujero negro que captaba esa colaboración (ya habían obtenido la icónica imagen de M87*, presentada al público en abril de 2019), pero sí era la más deseada. Y es que Sagitario A* es nuestro propio agujero negro supermasivo, el punto fijo alrededor del cual da vueltas toda la galaxia.

Los agujeros negros atrapan todo lo que cae en ellos, incluida la luz, por lo que, literalmente, no es posible verlos. Pero deforman tanto el espaciotiempo a su alrededor que proyectan una «sombra» al ser iluminados por los brillantes chorros de materia que se precipitan sobre ellos. La sombra es unas 2,5 veces más grande que el horizonte de sucesos, la frontera tras la cual ya no es posible escapar de la atracción gravitatoria del agujero negro. (Los fotones emitidos entre el borde de la sombra y el horizonte de sucesos tienen la opción de escapar, pero en la práctica casi ninguno lo hace, y por eso esa región aparece oscura.)

El EHT obtuvo imágenes de esta sombra gracias la interferometría de muy larga base (VLBI por sus siglas en inglés) [*véase* «Radioastronomía por interferometría de muy larga base», por Anthony C. S. Readhead; Investigación y Ciencia, agosto de 1982]. Esta técnica combina radiotelescopios situados en varios continentes para formar un telescopio virtual del tamaño de la Tierra, el instrumento con mayor resolución de toda la astronomía. En abril de 2017, la colaboración del EHT dirigió ese instrumento virtual hacia Sagitario A* y otros agujeros negros supermasivos durante varias noches. A continuación, los científicos se pasaron años analizando los datos brutos y convirtiéndolos en una imagen.

Una de las razones por las que les llevó tanto tiempo fue la devastación global causada por la pandemia de COVID-19. Pero la mayor dificultad fue que Sagitario A* no deja de cambiar. El otro agujero negro retratado por el observatorio, M87*, situado en el centro de la galaxia Messier 87 (M87), es tan inmenso que la materia que gira en torno suyo tarda muchas horas en completar una órbita. Y eso significa que uno puede observarlo durante un buen rato sin que apenas cambie. Pero Sagitario A* es más de mil veces menos masivo, y eso hace que su aspecto varíe unas mil veces más deprisa, ya que la materia se mueve alrededor suyo en órbitas más pequeñas y veloces. Katie Bouman, astrónoma y científica computacional del Instituto de Tecnología de California que codirige el grupo de trabajo de adquisición de imágenes del EHT, señala que la materia orbita tan rápido en torno a Sagitario A* que este cambia «en cuestión de un minuto». Fotografiarlo no es fácil: es como captar una bala en pleno vuelo.

La naturaleza voluble de Sagitario A* hace que sea difícil observarlo, pero también lo convierte en un laboratorio ideal para entender los agujeros negros y la relatividad general, la célebre teoría de la gravedad de Einstein. Tras estudiarlo durante décadas con todo tipo de telescopios, los astrónomos ya conocían con gran precisión las propiedades básicas de Sagitario A*, como su masa, diámetro o distancia a la Tierra. Ahora, por

fin, podrán ver cómo evoluciona en tiempo real mientras devora fulgurantes chorros de materia.

Un velo de varias capas

Los científicos comenzaron a sospechar que el centro de nuestra galaxia escondía un agujero negro a principios de la década de 1960, poco después de descubrir los núcleos activos de galaxias: regiones muy brillantes situadas en los centros de algunas galaxias distantes y que están iluminadas por voraces agujeros negros supermasivos. Desde nuestra perspectiva, los núcleos activos de galaxias son cosa del pasado: solo los vemos en zonas remotas y, por tanto, antiguas del universo. ¿Dónde fueron a parar esos monstruos? En 1969, el astrofísico Donald Lynden-Bell llegó a la conclusión de que no se habían ido a ninguna parte: tan solo se habían echado a dormir. Según las predicciones de Lynden-Bell, en el centro de casi todas las galaxias espirales, incluida la nuestra, yace un enorme agujero negro latente.

En 1974, los astrónomos Bruce Balick y Robert Brown apuntaron los radiotelescopios de Green Bank, en Virginia Occidental, al centro de la Vía Láctea y descubrieron una tenue mota. La encontraron en una región del cielo conocida como Sagitario A, en la constelación de Sagitario, y sospecharon que se trataba del agujero negro central de nuestra galaxia. La radiación de la nueva fuente iluminaba, o «excitaba», las nubes de hidrógeno de alrededor. En física atómica, los átomos excitados se suelen distinguir con un asterisco, así que Brown tomó prestada esa notación y llamó Sagitario A* a la mota recién descubierta.

Durante las dos décadas siguientes, los radioastrónomos fueron mejorando poco a poco su visión de Sagitario A*, pero se encontraban limitados por la falta de telescopios apropiados, algunos dispositivos relativamente toscos (por ejemplo, cintas magnéticas como las de un magnetófono) y las dificultades propias de observar el abarrotado centro galáctico.

Sagitario A* se oculta tras un velo de varias capas. La primera es el plano galáctico: 27.000 años luz de estrellas, gas y polvo que obstruyen el paso de la luz visible. Las ondas de radio atraviesan ese plano sin impedimentos, pero hallan un obstáculo en la segunda capa del velo, constituida por las variaciones de densidad del medio interestelar, que dispersan ligeramente las ondas de radio. La última capa que cubre el agujero negro es la materia que lo envuelve y se precipita sobre él. Ver a través de esa barrera es casi como pelar las capas de una cebolla. La materia más exterior emite luz con longitudes de onda largas, las mismas con las que se suele trabajar en VLBI. Pero para atisbar regiones más próximas al horizonte de sucesos del agujero negro hay que detectar longitudes de onda más cortas, en el rango de las microondas, lo cual constituía un gran reto técnico para la VLBI.

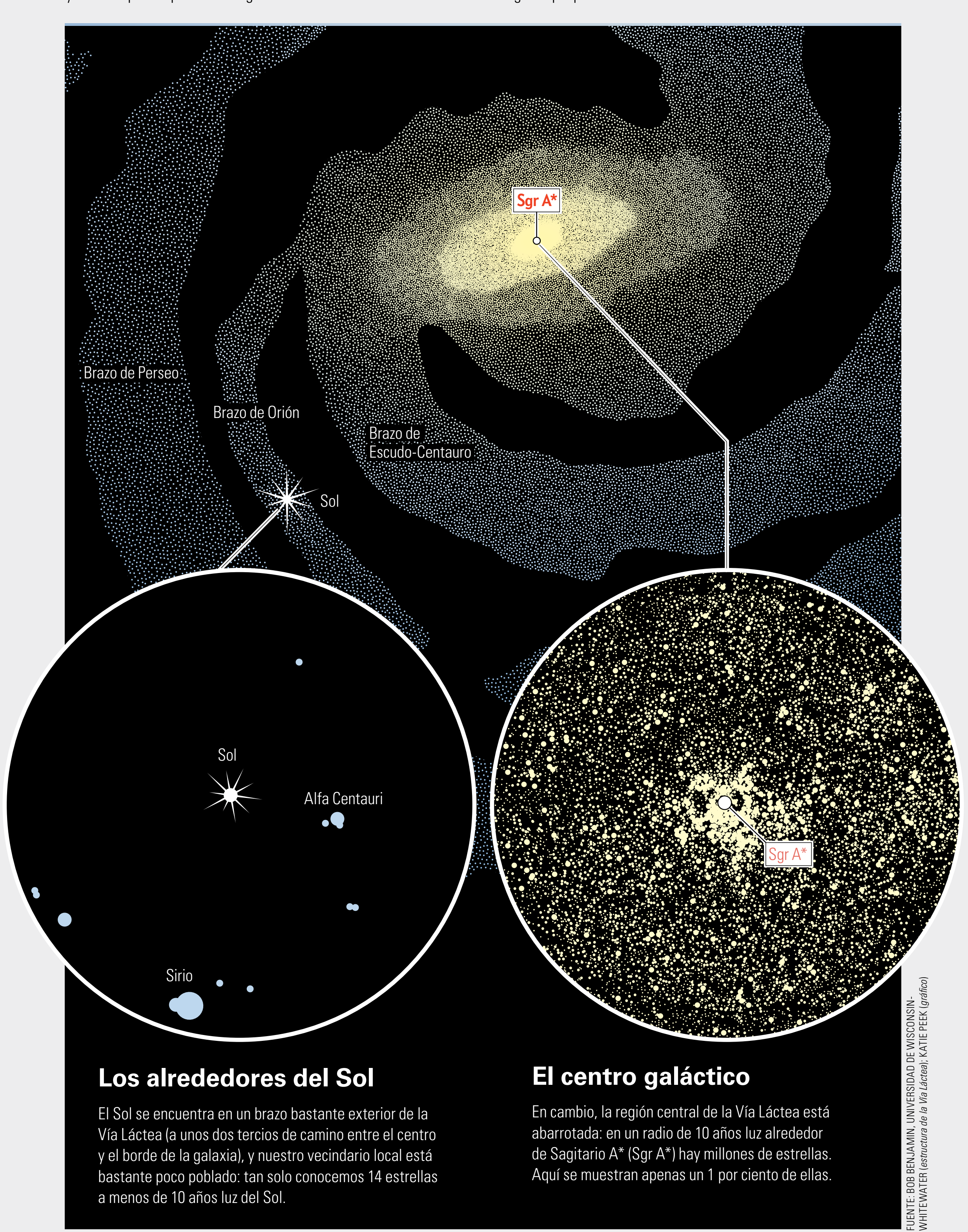
Durante un tiempo, otras técnicas tuvieron más éxito que la VLBI y fueron aportando pruebas indirectas de que la «mota» de Sagitario A* era en realidad un furibundo agujero negro supermasivo. En los ochenta, el físico Charles Townes y sus colaboradores mostraron que la única manera de explicar el movimiento de las nubes de gas del centro galáctico era suponer que estaban bajo la influencia gravitatoria de una gran masa oculta [*véase* «¿Qué está ocurriendo en el centro de nuestra galaxia?», por Charles H. Townes y Reinhard Genzel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1990]. Y en los noventa, Ghez y Genzel empezaron a estudiar por separado las órbitas de las estrellas gigantes azules en el centro de la galaxia, cartografiando sus desplazamientos en torno a un cuerpo muy pesado, pero invisible.

Sagitario A* sigue una dieta estricta: menos del 1 por ciento del material capturado por su gravedad llega a cruzar el horizonte de sucesos

Entretanto, la situación iba mejorando para los radioastrónomos. A finales de los noventa y principios de este siglo, comenzó a operar una nueva generación de radiotelescopios de longitud de onda corta que, con la ayuda de numerosos instrumentos complementarios, podían tomar parte en observaciones de VLBI a las frecuencias supuestamente emitidas desde el borde de

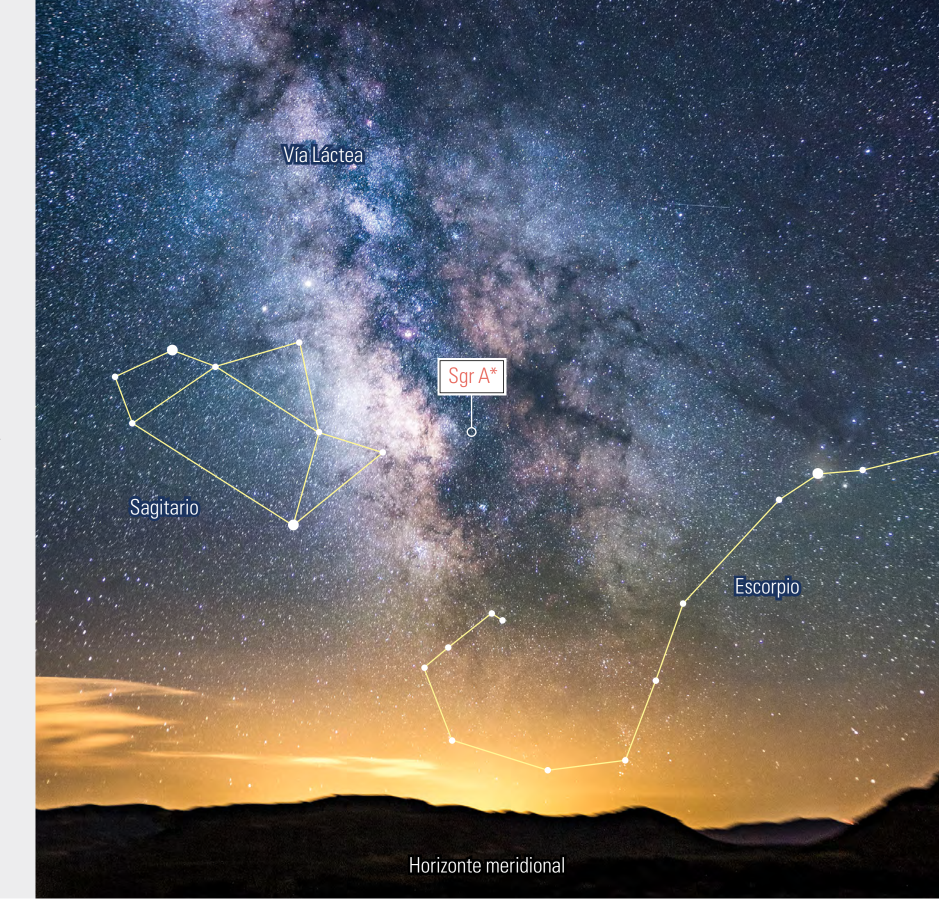
Nuestro agujero negro

El agujero negro supermasivo de la Vía Láctea, Sagitario A*, se halla a unos 27.000 años luz de la Tierra, en la región densa y caótica que ocupa el centro galáctico. Con un diámetro similar al de la órbita de Mercurio alrededor del Sol, no es precisamente pequeño, pero está tan lejos que lo vemos con el mismo tamaño angular que presentaría un dónut en la Luna.



El centro de la Vía Láctea

Sagitario A* (Sgr A*) y todo el centro galáctico se encuentran cerca de la constelación de Sagitario. Uno de los grandes retos a los que se enfrentó el Telescopio del Horizonte de Sucesos fue hallar momentos en los que Sagitario A* estuviera por encima del horizonte para todos los observatorios de la red, que se sitúan en varios continentes y en los dos hemisferios.



FELOI OMELLA/GETTY IMAGES (*fotografía de la Vía Láctea*); KATIE PEEK (*gráfico*)

la sombra de Sagitario A*. Al mismo tiempo, la misma revolución computacional que dio lugar a los discos duros de estado sólido y los teléfonos inteligentes elevó de forma sustancial la cantidad de datos que podía registrar y procesar cada observatorio de una red de radiotelescopios.

En 2007, un pequeño precursor del EHT aprovechó esos avances y empleó un trío de telescopios en Hawái, California y Arizona para atravesar el velo que rodea a Sagitario A*. El resultado distaba mucho de ser una imagen, pero mostraba algo, presumiblemente indicios de la anhelada sombra.

La primera predicción de esas sombras data de 1973, cuando el físico James Bardeen mostró que un agujero negro dibujaría una silueta contra un fondo brillante. Bardeen concluyó que no parecía haber «ninguna esperanza de observar ese efecto», pero, en el año 2000, los astrofísicos Heino Falcke, Fulvio Melia y Eric Agol razonaron que un telescopio de microondas del tamaño de la Tierra debería ser capaz de captar la sombra de Sagitario A*.

Un lustro después, unas decenas de astrónomos y astrofísicos se fijaron el objetivo formal de construir un radiotelescopio virtual del tamaño del planeta para observar esa sombra. El primer encuentro oficial del proyecto tuvo lugar en enero de 2012, y así fue como nació el Telescopio del Horizonte de Sucesos.

Cinco años más tarde, el EHT (convertido en una colaboración en la que participaban más de 200 científicos y 8 observatorios de todo el planeta) hizo su primer intento realista de atisbar la sombra de Sagitario A*. En el transcurso de 10 días de abril de 2017, varios telescopios de Norteamérica, Sudamérica, Hawái, Europa y la Antártida apuntaron de forma simultánea al agujero negro del centro de nuestra galaxia, y también a otros. Recopilaron 65 horas de datos en 1024 discos duros de 8 teraoctetos cada uno y los enviaron a superordenadores de EE.UU. y Alemania para su correlación. Al cabo de otros cinco años, los exultantes investigadores del EHT mostraron al mundo que su experimento había funcionado.

Un dónut en la Luna

El día que la colaboración del EHT divulgó la imagen de Sagitario A*, la revista *Astrophysical Journal Letters* publicó un número especial dedicado a los nuevos resultados. A lo largo de seis artículos técnicos, los investigadores presentaron

un retrato multidimensional de nuestro agujero negro.

La fotografía del EHT confirmó sus propiedades básicas. Hace tiempo que sabemos que Sagitario A* está a unos 27.000 años luz de distancia. Tras estudiar durante años, por medio de telescopios infrarrojos, las órbitas de las estrellas que giran a su alrededor, los astrónomos ya tenían una idea precisa de la masa del agujero negro: el equivalente a unos cuatro millones de soles. Insertando esos dos números (distancia y masa) en las ecuaciones derivadas de la relatividad general, es posible calcular el tamaño que debería tener la sombra del agujero negro. Y, como cabía esperar, la imagen se ajusta a esa predicción. La sombra tiene un diámetro de 52 microsegundos de arco, lo que significa que, desde la Tierra, la vemos con el mismo tamaño angular que presentaría «un dónut en la Luna», en palabras de los astrónomos. Después de examinar las sombras de Sagitario A* y M87*, cuyas masas difieren en tres órdenes de magnitud, los científicos concluyeron que el fenómeno es una «característica universal de los agujeros negros».

Las observaciones del EHT, combinadas con el seguimiento simultáneo de otros instrumentos, como los telescopios de rayos X Chandra y Nu-STAR, están empezando a despejar antiguas incógnitas sobre el entorno de Sagitario A*. Midiendo el espectro de la luz procedente del objeto (es decir, la intensidad de sus frecuencias constituyentes), los astrónomos determinaron hace tiempo que la materia que envuelve el agujero negro es un gas difuso de electrones y protones. Ahora entendemos mucho mejor de dónde procede esa materia: los datos de Chandra muestran que el agujero negro la arranca de la atmósfera de las estrellas que orbitan alrededor suyo. Aunque tampoco es que extraiga mucha: Sagitario A* sigue una dieta estricta, y menos del 1 por ciento del material capturado por su gravedad llega a cruzar el horizonte de sucesos. Eso explica por qué es tan tenue: pese a ser cuatro millones de veces más masivo que el Sol, Sagitario A* es solo 100 veces más brillante.

Pero nuestro agujero negro no ha estado siempre tan apagado. Parece que hace apenas unos 60 o 70 años se dio un atracón, un estallido de actividad que dejó «ecos lumínicos» (luz que rebotó en las nubes cercanas de polvo y gas) detectados con telescopios de rayos X. Y aún tiene sus momentos activos. El 11 de abril de 2017, Sagitario A* emitió un brillante destello de rayos X, seguramente debido a la torsión y reconexión de las líneas de campo magnético en la materia que orbita alrededor del agujero negro. Esa es la misma dinámica que causa las fulguraciones de nuestra estrella [*véase* «El origen de las fulguraciones solares», por Gordon D. Holman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2006]. Observar de forma directa tales erupciones será un objetivo principal de las próximas campañas.

Todavía nos queda mucho que aprender sobre Sagitario A*. Por ejemplo, los datos del EHT muestran que el agujero negro está rotando, como cualquier cuerpo celeste, pero no sabemos a qué velocidad. Las futuras observaciones también pretenden precisar el modo en que engulle la materia el agujero negro y, con un poco de suerte, elaborar películas de su evolución con el tiempo.

La primera imagen de Sagitario A* representa solo un primer paso, pero zanja la cuestión de si se trata o no de un agujero negro. La presencia de una sombra distintiva significa que posee un horizonte de sucesos, el rasgo definitorio de los agujeros negros. Por fin sabemos que no es una estrella muy muy densa, un agujero de gusano, una singularidad desnuda (un punto de densidad infinita que no estaría escondido tras un horizonte de sucesos) ni ningún otro de los objetos exóticos que han ido proponiendo los teóricos a lo largo de los años [*véase* «Singularidades desnudas», por Pankaj S. Joshi; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2009]. No es ni más ni menos que un agujero negro supermasivo (algo de por sí bastante extraño, qué duda cabe) que ahora se muestra ante nuestros ojos, más cerca de revelar sus secretos.

Seth Fletcher es editor de *Scientific American*. Ha escrito *Einstein's shadow* (Ecco, 2018), un libro sobre el Telescopio del Horizonte de Sucesos y los esfuerzos que llevaron a obtener la primera fotografía de un agujero negro.



EN NUESTRO ARCHIVO

Retrato de un agujero negro. Avery E. Broderick y Abraham Loeb en *IyC*, febrero de 2010.

La prueba del agujero negro. Dimitrios Psaltis y Sheperd S. Doeleman en *IyC*, noviembre de 2015.

La primera imagen de un agujero negro. Ernesto Lozano Tellechea en www.investigacionyciencia.es, 11 de abril de 2019.

Primera imagen del agujero negro central de la Vía Láctea. Davide Castelvecchi en www.investigacionyciencia.es, 17 de mayo de 2022.

INFORME ESPECIAL

HALLAZGOS SOBRE AGUJEROS NEGROS

El observatorio de ondas gravitacionales LISA constará de tres naves espaciales que formarán un triángulo equilátero y describirán una órbita alrededor del Sol siguiendo a la Tierra.

ONDAS GRAVITACIONALES

GEODESIA DE AGUJEROS NEGROS

Carlos F. Sopuerta | La detección de ondas gravitacionales desde el espacio puede ayudarnos a entender la estructura de los agujeros negros y la propia naturaleza de la gravedad

La geodesia es una disciplina de larga tradición que busca entender mejor nuestro planeta. Según el diccionario de la Real Academia Española, es la «ciencia matemática que tiene por objeto determinar la figura y magnitud del globo terrestre, o de gran parte de él, y construir los mapas correspondientes». Por analogía con la geodesia, en los últimos tiempos ha surgido una nueva ciencia dedicada al estudio y la caracterización de la geometría de los agujeros negros que pensamos que pueblan el cosmos. (En inglés, este nuevo campo ha recibido nombres como *bothrodesy* o *holiodesy*, derivados del griego *bothros*, «fosa», y del inglés *hole*, «agujero», respectivamente.) Y digo «pensamos» porque los agujeros negros, en esencia, son una consecuencia matemática de la relatividad general. Cada vez conocemos más objetos en el cosmos que parecen agujeros negros como los que describe la teoría, pero aún no tenemos pruebas suficientes para asegurar que lo sean, aunque se trate de la explicación más probable [*véase* «Ecos desde el horizonte», por Pablo Bueno y Pablo A. Cano; Investigación y Ciencia, junio de 2019].

En particular, tenemos bastantes indicios de que cada galaxia hospeda en su centro un agujero negro supermasivo. El candidato a agujero negro mejor estudiado sería justo uno de ellos: Sgr A*, un objeto situado en el centro de la Vía Láctea que concentra más de cuatro millones de masas solares en una región unas decenas de veces más ancha que nuestra estrella. La combinación de telescopios en la banda de ondas de radio está aportando cada vez más pruebas de que Sgr A* es un agujero negro, aunque todavía no podemos descartar del todo que se trate de un objeto muy exótico cuya composición trascienda nuestros conocimientos actuales. Para entender la importancia de esas observaciones, baste mencionar que los astrofísicos Andrea Ghez y Gerhard Geinzel recibieron por ellas el premio Nobel de física de 2020 (compartido con el físico matemático Roger Penrose, quien fue galardonado por sus estudios teóricos sobre los agujeros negros).

Intentar trasladar las técnicas de la geodesia al estudio de los agujeros negros es una forma original y prometedora de entender mejor estos objetos. Y no solo para confirmar su existencia y sus principales propiedades, sino también para comprobar si la relatividad general sobrevive a una de sus predicciones más radicales (la otra sería la gran explosión) o, por el contrario, precisamos una teoría alternativa, quizás una que incluya aspectos de la física cuántica. De hecho, el elemento fundamental que necesitamos para la geodesia de agujeros negros es otra de las principales predicciones de la relatividad general: las ondas gravitacionales, que pueden proporcionar información muy valiosa para entender los agujeros negros e incluso la propia gravedad.

EN SÍNTESIS

Los sistemas en caída espiral con razón de masa extrema, o EMRI, están formados por un agujero negro de masa estelar que orbita en torno a un agujero supermasivo como el que ocupa el centro de la Vía Láctea.

La misión LISA de la Agencia Espacial Europea detectará desde el espacio las ondas gravitacionales emitidas por esos sistemas, lo que permitirá aplicar técnicas geodésicas al estudio de los agujeros negros.

Esas observaciones permitirán poner a prueba la geometría de los agujeros negros y comprobar si se ajusta a la que predice la relatividad general, así como constreñir otras teorías gravitatorias alternativas.

Teorías gravitatorias

Nuestra comprensión física del universo se basa en la existencia de cuatro fuerzas o interacciones fundamentales: la interacción electromagnética, la nuclear débil, la nuclear fuerte y la gravedad. Esta última fue descrita por Isaac Newton en 1687 en su célebre *Philosophae naturalis principia mathematica*. En la escuela aprendemos que la fuerza de atracción gravitatoria entre dos objetos es proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, y también que se ejerce a distancia, sin nada que medie entre los objetos. Además, y quizás esto no es tan obvio, la fuerza se transmite de manera instantánea, a una velocidad infinita. A pesar de los problemas filosóficos que entrañan estas dos últimas características de la gravedad newtoniana, la teoría lleva más de tres siglos ofreciendo excelentes resultados. Entre otras cosas, nos ha facilitado una descripción precisa del movimiento de los diferentes objetos del sistema solar, incluidas las trayectorias de las misiones espaciales. Y una de sus grandes aplicaciones es la geodesia con satélites.

El resto de interacciones no comparten la instantaneidad con que se propaga la fuerza gravitatoria en la teoría newtoniana: el electromag-

netismo, por ejemplo, se transmite a la velocidad de la luz. A su vez, la luz está formada por campos electromagnéticos oscilantes que viajan como ondas a través del espaciotiempo. En cambio, en la física newtoniana no hay ondas de gravedad y, además, al combinarla con la teoría electromagnética surgen dificultades, ya que las leyes de esta última no son las mismas para todos los observadores. Este problema causó gran preocupación entre los físicos, hasta que Albert Einstein dio con la solución en 1905: su teoría de la relatividad especial establece una nueva visión de la estructura del espaciotiempo que permite preservar la universalidad de las leyes del electromagnetismo.

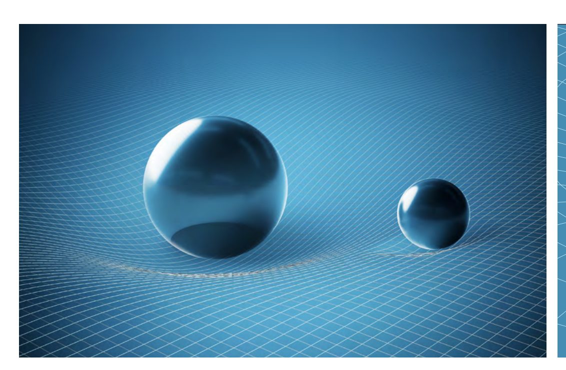
Pero, como ocurre tantas veces, la solución a un problema creó otro: la ley de la gravitación universal de Newton no era compatible con la estructura espaciotemporal de la relatividad. Eso empujó a Einstein a un largo viaje intelectual que culminó en 1915, cuando presentó las ecuaciones relativistas del campo gravitatorio, es decir, la teoría general de la relatividad.

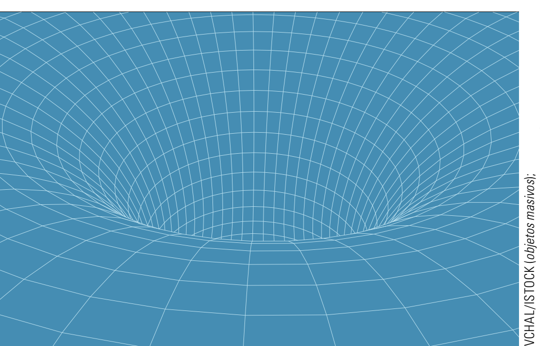
La relatividad general supuso una revolución conceptual en nuestra comprensión del mundo. En ella, la gravedad deja de ser una fuerza para convertirse en la manifestación de la geometría del espacio y el tiempo, lo que la diferencia del resto de interacciones. Para entenderlo, pensemos en un espaciotiempo vacío, sin masa ni energía. En tal caso, la geometría del espacio sería la euclídea, la que nos resulta intuitiva y en la cual las rectas paralelas solo se cruzan en el infinito, los ángulos de un triángulo suman 180 grados y se cumple el teorema de Pitágoras. Además, en un espaciotiempo vacío, el tiempo pasa igual para todos los observadores. Si ahora ponemos una masa en algún lugar del espacio, esta deforma la geometría a su alrededor, de modo que ya no es euclídea. Debido a la curvatura espaciotemporal que genera esa masa, otro objeto cercano más pequeño describiría una órbita en torno suyo, en vez de seguir una trayectoria recta. Así es como la relatividad general explica, en particular, el movimiento de los planetas alrededor del Sol sin recurrir a la acción a distancia instantánea de la teoría newtoniana.

Agujeros negros

Dos nuevos fenómenos que predice la relatividad general son los agujeros negros y las ondas gravitacionales. Para comprender qué es un agujero negro, supongamos que tenemos un objeto con cierta masa y que podemos concentrar esa masa en un espacio cada vez más pequeño. Conforme aumenta la densidad del objeto, también lo hará la curvatura de la región del espacio en la que se encuentra, por lo que cada vez será más difícil para cualquier objeto escapar de ella. De hecho, llegará un momento en el que la concentración de masa será tan alta, y la curvatura tan grande, que ni siquiera la luz (que viaja a la máxima velocidad posible) podrá escapar. Entonces, se habrá formado un agujero negro. Es decir, un agujero negro no es un objeto propiamente dicho, sino una región del espaciotiempo de la que nada, ni siquiera la luz, puede salir. La frontera que marca el punto de no retorno es lo que llamamos el horizonte de sucesos del agujero negro.

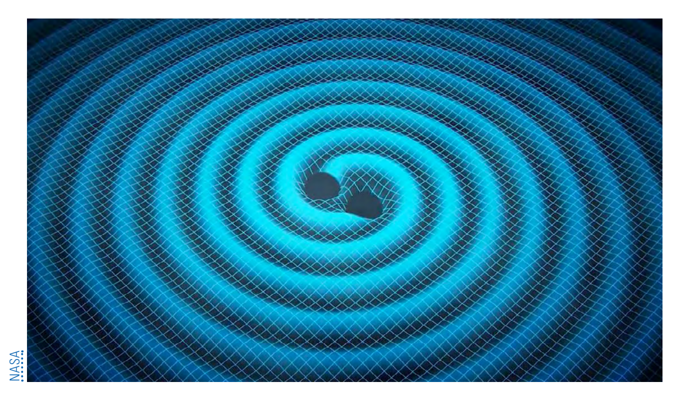
Una de las principales características de los agujeros negros de la relatividad general es que tan solo necesitamos dos números para describirlos: su masa y su rotación intrínseca, o espín. (Los agujeros negros también podrían tener carga eléctrica, pero en un contexto astrofísico la perderían





VCHAL/ISTOCK (*objetos masivos*); MAKSYM KAPLUN/ISTOCK (*agujero negro*)

Según la relatividad general, la presencia de masa o energía deforma el espaciotiempo (*izquierda*). Así, la curvatura creada por un objeto masivo puede llevar a que otro describa un movimiento orbital a su alrededor. Los agujeros negros surgen cuando la densidad de masa es tan grande que la curvatura del espaciotiempo se hace infinita (*derecha*).



Los sistemas físicos cuya distribución de masa y energía cambia con el tiempo, como los sistemas binarios de objetos compactos (por ejemplo, agujeros negros o estrellas de neutrones), generan ondas gravitacionales: oscilaciones de la curvatura del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz.

muy deprisa.) La sencillez estructural de estos objetos llevó a Subrahmanyan Chandrasekhar, nóbel de física en 1983, a afirmar que «los agujeros negros de la naturaleza son los objetos macroscópicos más perfectos que existen en el universo: los únicos elementos en su construcción son nuestros conceptos de espacio y tiempo. Y, dado que la relatividad general proporciona una única familia de soluciones para describirlos, son también los objetos más simples». Las soluciones a las que aludía Chandrasekhar se conocen como agujeros negros de Kerr, y representan todos los agujeros negros aislados que pueden existir en el contexto de la relatividad general.

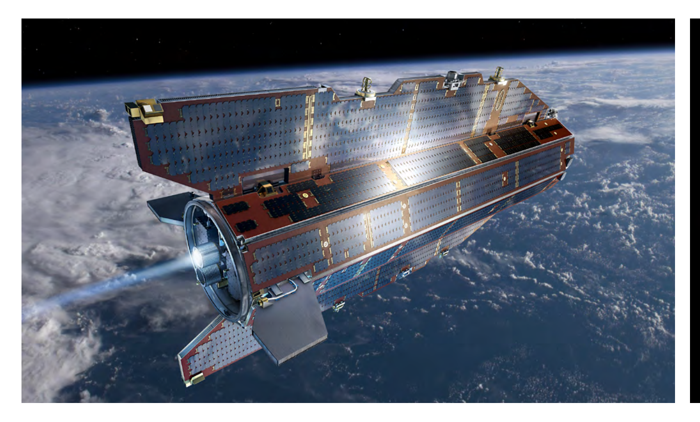
Ondas gravitacionales

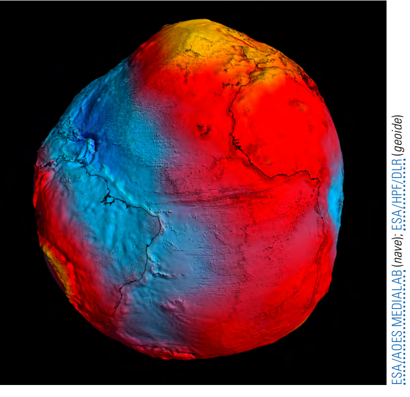
Ya hemos visto que la masa y la energía curvan el espaciotiempo. Ahora imaginemos un sistema cuya distribución de masa y energía cambia con el tiempo, por ejemplo, un sistema binario donde un objeto orbita en torno a otro. La consecuencia inmediata de esa variación es que la curvatura que genera el sistema también irá cambiando, es decir, tendremos oscilaciones de la curvatura del espaciotiempo que (según la relatividad general) se propagarán por el espacio a la velocidad de la luz, en forma de ondas gravitacionales.

De hecho, Henri Poincaré ya se había percatado en 1905, sin una descripción matemática concreta, que, del mismo modo que el electromagnetismo predecía la existencia de ondas electromagnéticas (luz), una teoría relativista de la gravedad debía dar lugar a ondas gravitacionales que viajasen a la misma velocidad que la luz. Einstein fue el primero que analizó las propiedades de esas ondas y vio que, en su viaje por el cosmos, alterarían la geometría local de las zonas que atravesaran, modificando la distancia física entre los cuerpos presentes en ellas. También entendió que, al igual que la luz, las ondas gravitacionales eran transversales, es decir, que los cambios de distancia ocurrirían en el plano perpendicular a la dirección de propagación.

Debido a que la gravedad es la más débil de todas las interacciones, las variaciones de distancia que producen las ondas gravitacionales son extremadamente pequeñas. De hecho, en la época de Einstein, resultaba impensable diseñar un dispositivo capaz de medirlas. Incluso hoy en día, solo tenemos acceso a las ondas gravitacionales producidas en cataclismos cósmicos, como la colisión entre dos agujeros negros o dos estrellas de neutrones. Pero ¿cómo podemos detectarlas? Por un lado, necesitamos un dispositivo donde haya masas «en caída libre», es decir, sobre las que no actúen fuerzas no gravitatorias (electromagnéticas, de origen térmico, etc.), para evitar que otros efectos enmascaren la presencia de las ondas gravitacionales. Y también hace falta un aparato de medida que permita observar cambios diminutos en la distancia entre esas masas en caída libre.

Los esfuerzos por detectar las ondas gravitacionales comenzaron a finales de la década de 1950 y culminaron en 2015, cien años después de que Einstein presentase su teoría. Ese año, el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), que consta de dos instrumentos situados en extremos opuestos de EE.UU., registró por primera vez las ondas gravitacionales emitidas en la fusión de dos agujeros negros. A fin de entender el reto que supusieron esas mediciones, señalemos que LIGO es capaz de medir cambios de distancia del orden de la milésima parte del radio de un núcleo atómico, lo que equivale a determinar la separación entre la Tierra y el Sol con un error menor que el ancho de un cabello humano. Para ello, emplea la interferometría láser: envía luz láser a lo largo de dos largos brazos perpendiculares, cada uno con un espejo en su extremo. Al volver, los dos haces se combinan, y el patrón de interferencia resultante revela si la diferencia de longitud entre los brazos ha variado debido al paso de una onda gravitacional.





ESA/AOES MEDIALAB (*nave*); ESA/HPF/DLR (*geoide*)

El satélite GOCE de la ESA (*izquierda, recreación*) describió una órbita muy baja (a una altura de 250 kilómetros) en torno a la Tierra para generar el modelo más preciso del geoide (*derecha*) hasta la fecha.

La detección de LIGO mereció el premio Nobel de física de 2017 y supuso el nacimiento de un nuevo campo: la astronomía de ondas gravitacionales. Dichas ondas constituyen otro «mensajero cósmico» que nos permite explorar los fenómenos más extremos del universo [*véase* «Mensajeros celestes», por Ann Finkbeiner; Investigación y Ciencia, julio de 2018]. A LIGO se le han unido otros dos detectores terrestres: Virgo, en Italia, y, más recientemente, KAGRA, en Japón. Hasta la fecha, se han detectado las ondas gravitacionales de más de 90 fusiones de sistemas binarios compactos (agujeros negros o estrellas de neutrones). Esos eventos han proporcionado mucha información, que ha tenido importantes repercusiones en astrofísica, cosmología y física fundamental. Y esto no es más que el comienzo, puesto que ya hay planes para una tercera generación de detectores terrestres que mejorará en un orden de magnitud la precisión de los instrumentos actuales.

Igual que hay distintos tipos de luz en función de su frecuencia o su longitud de onda, también hay diferentes clases de ondas gravitacionales. Los detectores terrestres no son capaces de captar las ondas gravitacionales de baja frecuencia (con periodos en torno a una hora), por culpa de las fluctuaciones que inducen en el campo gravitatorio terrestre factores como las mareas o la actividad humana. Esas ondas gravitacionales resultan de gran interés debido al tipo de fuentes que las producen y, para detectarlas, la Agencia Espacial Europea (ESA) está desarrollando la Antena Espacial de Interferometría Láser (LISA), que se lanzará en torno al año 2035. La misión LISA constará de tres naves espaciales dispuestas en una constelación con la forma de un triángulo equilátero de 2,5 millones de kilómetros de lado y que seguirán una órbita alrededor del Sol. Las naves llevarán en su interior masas en caída libre y controlarán la distancia entre ellas intercambiando haces láser. De este modo, realizarán interferometría láser para registrar el paso de ondas gravitacionales de baja frecuencia. Cabe destacar que la ESA ya ha demostrado la viabilidad técnica de esta propuesta por medio de una misión previa, llamada LISA Pathfinder.

LISA podrá detectar una gran variedad de fenómenos, como colisiones entre agujeros negros supermasivos, sistemas binarios ultracompactos (donde los objetos tienen periodos orbitales del orden de una hora) en nuestra galaxia o fondos de ondas gravitacionales de origen cosmológico. Aquí nos centraremos en uno de ellos: las «caídas en espiral con razón de masa extrema» (EMRI, por sus siglas en inglés), es decir, la captura de un objeto estelar compacto, normalmente un agujero negro de masa estelar, por un agujero supermasivo. Las observaciones de LISA permitirán estudiar cuestiones tan relevantes como el origen y crecimiento de los agujeros negros supermasivos, su conexión con los procesos de formación y evolución galáctica o la dinámica de las distribuciones de estrellas en los núcleos galácticos. También servirá para comprobar si los agujeros negros son como los describe la relatividad general y para poner a prueba esta teoría, así como otras teorías gravitatorias alternativas.

Geodesia

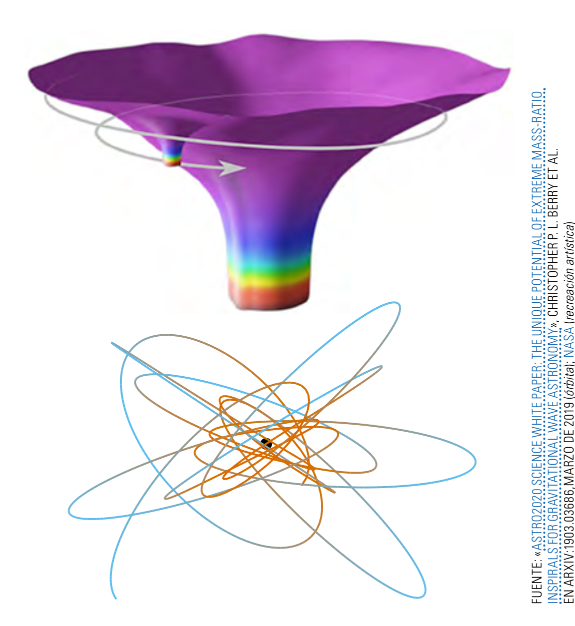
Volviendo al tema de la geodesia, una de sus aplicaciones es la medición precisa del campo gravitatorio de la Tierra. Otra cosa fundamental que aprendemos en la escuela es que todos los cuerpos caen de la misma forma, es decir, con la

misma aceleración, bajo la acción de la gravedad terrestre. Y que esa aceleración *g* es esencialmente la misma en todo el planeta, con un valor de 9,8 m/s². Sin embargo, a medida que se desarrollaron herramientas más avanzadas, se hizo evidente que la fuerza de la gravedad cambia de un lugar a otro de la superficie.

Hay diversos factores que contribuyen a esa variación. El principal es la rotación terrestre, que aplana ligeramente el planeta: este pasa a ser un elipsoide en lugar de una esfera, de modo que la distancia entre el centro de la Tierra y la superficie es mayor en el ecuador que en los polos. Como resultado, el valor de *g* oscila desde un mínimo de 9,78 m/s² en el ecuador hasta un máximo de 9,83 m/s² en los polos. Por otro lado, la superficie de la Tierra es muy irregular, y las altas montañas y las profundas fosas oceánicas también modifican el valor de la gravedad. Además, los materiales del interior del planeta no están distribuidos de manera uniforme: no es solo que las capas de la corteza y el manto sean irregulares, sino que la distribución de masa dentro de ellas tampoco es homogénea. Y, aparte de todo eso, también influyen los depósitos de petróleo, minerales y agua, los movimientos de los casquetes de hielo, las erupciones volcánicas o incluso los grandes edificios.

El campo gravitatorio de la Tierra da lugar a una superficie virtual, llamada «geoide», que es la forma que adoptaría la superficie de los océanos bajo la acción de la gravedad terrestre y en ausencia de otros efectos, como los vientos o las mareas, y que se extiende a través de los continentes. Como consecuencia de su definición, la fuerza de la gravedad es siempre perpendicular a cualquier punto del geoide. Carl Friedrich Gauss lo describió por primera vez en 1828 y lo denominó la «figura matemática de la Tierra», una superficie lisa pero irregular cuya forma resulta de la distribución desigual de la masa en el interior del planeta y sobre su superficie. La determinación del geoide, el objeto de la geodesia, requiere numerosas mediciones y cálculos gravitatorios, por lo que hubo que esperar hasta finales del siglo pasado para poder realizarla con gran precisión, gracias a los avances en la geodesia con satélites artificiales.

Uno de dichos satélites fue el Explorador del Campo Gravitatorio y la Circulación Oceánica (GOCE) de la ESA, que estuvo en funcionamiento desde marzo de 2009 hasta octubre de 2013 y produjo el modelo más preciso del geoide obtenido hasta la fecha. El satélite describió una órbita muy baja, a una altura de apenas 250 kilómetros, para lograr que la señal del campo gravitatorio terrestre fuera lo más intensa posible. GOCE empleó tres pares de acelerómetros, cuyos sensores se encontraban en caída libre gracias al sistema de compensación de la resistencia y control de actitud (DFACS, por sus siglas en inglés), para medir el campo gravitatorio terrestre con un detalle sin precedentes. Para hacernos una idea, cada acelerómetro detectaba cambios de una parte en 10 billones en la aceleración de la gravedad. Así, GOCE determinó el geoide con una precisión de 1 o 2 centímetros en la dirección vertical y una resolución espacial de 100 kilómetros. El mapa de gravedad y el modelo del geoide resultantes ofrecen a los investigadores de todo el mundo datos esenciales para el avance de la ciencia, con aplicaciones en múltiples disciplinas.



FUENTE: «ASTRO2020 SCIENCE WHITE PAPER: THE UNIQUE POTENTIAL OF EXTREME MASS-RATIO INSPIRALS FOR GRAVITATIONAL WAVE ASTRONOMY», CHRISTOPHER P. L. BERRY ET AL. EN ARXIV:1903.03686, MARZO DE 2019 (*órbita*); NASA (*recreación artística*)

Recreación de un sistema de tipo EMRI (*arriba*), es decir, un agujero negro de masa estelar que cae en espiral hacia un agujero negro supermasivo. Los colores más cálidos indican una mayor curvatura espaciotemporal. Cuando se encuentra cerca del horizonte de sucesos del agujero supermasivo, el agujero pequeño describe una órbita muy complicada (*abajo*). El fragmento de órbita mostrado aquí se completaría en unas pocas horas, y las partes marrones son las más próximas al horizonte.

Geodesia de agujeros negros

La idea de LISA es llevar a cabo una labor parecida a la que realizó GOCE en la Tierra, pero con los agujeros negros supermasivos. De hecho, ambas misiones comparten algunos aspectos téc-

nicos, aunque el objetivo científico de LISA requiere dispositivos aún mucho más precisos, en particular, con relación al sistema DFACS.

Para realizar geodesia de agujeros negros con ondas gravitacionales, LISA utilizará una de las principales fuentes de estas ondas: los sistemas de tipo EMRI que ya hemos mencionado, donde un agujero negro de masa estelar (con entre 5 y 100 veces la masa del Sol) orbita en torno a un agujero negro supermasivo (con varios millones de masas solares) situado en un centro galáctico, a distancias cosmológicas de la Tierra. Así que la razón entre las masas de ambos objetos es del orden de uno entre un millón, y de ahí el nombre de estos sistemas. El agujero más pequeño se desplaza a velocidades cercanas a la de la luz, por lo que ya no tenemos las «sencillas» órbitas elípticas keplerianas que predicen las leyes de Newton, como la de la Tierra en torno al Sol, sino un movimiento tridimensional bastante complejo. Y eso es bueno para nuestros intereses, pues permite que el agujero negro estelar explore toda la geometría alrededor del agujero supermasivo.

Gracias a su dinámica relativista, los sistemas de tipo EMRI emiten ondas gravitacionales en la banda de frecuencias de LISA (entre 0,1 milihercios y 1 hercio), con la intensidad suficiente para ser detectadas. Esas ondas gravitacionales se llevan consigo energía del sistema, lo que se traduce en que la órbita del agujero negro estelar se va haciendo más pequeña, hasta llegar a la última órbita estable, momento en que el agujero negro estelar es absorbido por el supermasivo. Este es un proceso lento: durante el último año previo a la absorción, el agujero negro pequeño describe del orden de cien mil órbitas, todas muy próximas al horizonte de sucesos del agujero supermasivo, la región donde el campo gravitatorio es más intenso. Esta última fase de la evolución del sistema es la que nos interesa para la geodesia de agujeros negros.

Para entender mejor cómo nos ayudarán los sistemas de tipo EMRI a estudiar el campo gra-

Desarrollo multipolar

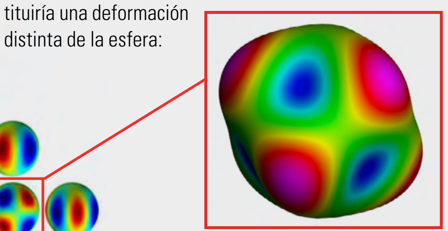
El modelo del geoide, la superficie equipotencial del potencial gravitatorio terrestre, se construye mediante una expansión multipolar: a primer orden, suponemos que es una esfera perfecta, y vamos agregando «multipolos» (deformaciones más y más pequeñas) en función de los datos obtenidos. Cuantos más multipolos añadamos, más fina y precisa será la aproximación.

En este caso, los multipolos son los armónicos esféricos, unas funciones matemáticas a partir de las que se puede construir cualquier función en la superficie de una esfera. Hay infinitos armónicos esféricos, y aquí mostramos los primeros:

Armónicos esféricos

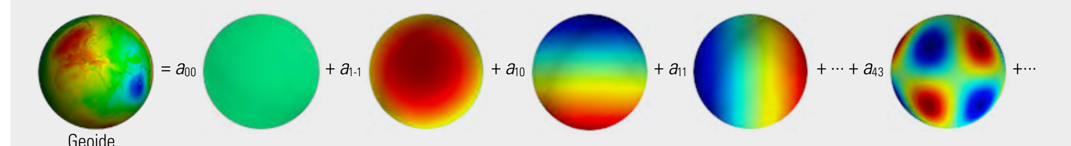
Los colores cálidos indican las zonas donde el valor del armónico esférico es positivo, y los colores fríos, aquellas donde es negativo.

Los armónicos esféricos se usan en muchos problemas físicos. Por ejemplo, si estamos estudiando la temperatura del fondo cósmico de microondas, las zonas azules representarían temperaturas inferiores a la media. En el caso del geoide, podemos pensar que los colores corresponden a distintas alturas, de modo que cada armónico esférico constituiría una deformación distinta de la esfera:



Armónico esférico visto como una deformación de la esfera

El geoide se puede expresar como una suma de armónicos esféricos, cada uno de ellos pesados por un coeficiente que se llama «momento multipolar» y que se obtiene mediante observaciones. De manera esquemática:



donde los coeficientes a_{lm} son los momentos multipolares que hay que determinar a partir de los datos. La misión LISA usará un desarrollo multipolar análogo para estudiar el campo gravitatorio de los agujeros negros supermasivos.

CENTRO INTERNACIONAL DE MODELOS GLOBALES DE LA TIERRA, ICGEM/GFZ POTSDAM (*geoide y armónico deformado*)

vitatorio de un agujero negro, ampliemos la analogía con GOCE: el agujero negro pequeño jugaría el papel del satélite, y el supermasivo, el de la Tierra. Y las ondas gravitacionales constituyen el mensajero que nos hará llegar, desde lugares remotos del universo, la información sobre el sistema de tipo EMRI. El análisis de datos posterior nos permitirá obtener los detalles del campo gravitatorio del agujero negro supermasivo, del mismo modo que el análisis del geoide nos ayuda a entender el de nuestro planeta.

La relatividad general, a prueba

¿Qué información proporcionará el estudio de sistemas de tipo EMRI con LISA? Los efectos del campo gravitatorio, ya sea el de la Tierra o el de un agujero negro, se pueden describir como la suma de una serie de deformaciones cada vez más pequeñas. Así, a primera aproximación, el geoide sería una esfera perfecta, a la que vamos añadiendo deformaciones más y más sutiles, de acuerdo con lo que nos dicen las observaciones. Este tipo de construcción matemática es lo que se llama un desarrollo multipolar. En ella tenemos infinitos «multipolos», cada uno de los cuales representa un tipo de deformación, que se suman multiplicados por un peso o momento multipolar que determina su importancia relativa. Los momentos multipolares se extraen de los datos, y GOCE logró determinar cientos de ellos.

La misión LISA espera medir muchos menos momentos multipolares del agujero negro supermasivo: apenas cinco. Pero con eso puede bastar para llevar a cabo ciencia revolucionaria. Pese a su aparente sencillez, los agujeros negros poseen infinitos momentos multipolares, pero todos vienen determinados tan solo por su masa y espín, a través de fórmulas exactas y bastante sencillas (de una línea) que nos da la relatividad general.

Supongamos que las observaciones de LISA de un sistema de tipo EMRI nos facilitan varios momentos multipolares. Con solo dos de ellos ya es suficiente para deducir la masa y el espín del agujero negro supermasivo. Y entonces, introduciendo esos dos parámetros en las fórmulas de la relatividad general, podemos calcular los valores teóricos de los otros momentos multipolares y compararlos con los medidos por LISA. Cada una de esas comparaciones constituye un test de la geometría de los agujeros negros: si los valores de los momentos multipolares observados no coincidiesen con los teóricos, la geometría de los agujeros negros no se ajustaría a la que predice la relatividad general. Y eso implicaría que, o bien no estamos ante agujeros negros, sino ante algún otro objeto exótico cuya naturaleza no entendemos aún, o bien la relatividad general no es la teoría correcta para describirlos. En definitiva, las observaciones de LISA permitirán poner a prueba nuestra descripción matemática de los agujeros negros.

Otra aplicación importante del estudio de sistemas de tipo EMRI es realizar test de la relatividad general y otras teorías de la gravedad. La forma de las ondas gravitacionales emitidas por un sistema depende en gran medida de la teoría gravitatoria. Por lo tanto, a través de análisis minuciosos de las observaciones de LISA podremos comprobar la validez de la relatividad general y poner límites a las teorías gravitatorias alternativas que han ido proponiendo los teóricos.

Los agujeros negros representan estados de gravedad extrema y son objeto de numerosas investigaciones realizadas desde distintos puntos de vista, desde la astrofísica hasta la física de frontera que busca unificar la relatividad general y la teoría cuántica. Las ondas gravitacionales que detectará LISA cuando se lance en la próxima década, en especial las generadas por sistemas de tipo EMRI, aportarán una información muy valiosa que podría revolucionar nuestra visión actual de los agujeros negros y de la naturaleza de la gravedad.

Carlos F. Sopuerta es investigador del Instituto de Ciencias del Espacio del CSIC, donde coordina el Grupo de Astronomía Gravitacional-LISA, y miembro del Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña. Trabaja en astrofísica relativista y física gravitatoria, con especial énfasis en la astronomía de ondas gravitacionales.



PARA SABER MÁS

Web de la misión LISA: https://sci.esa.int/web/lisa.

La astronomía de ondas gravitatorias en el siglo xxi. Alberto Lobo y Carlos F. Sopuerta en *Revista Española de Física*, vol. 25, n.º 2, págs. 8-12, 2011.

La misión LISA Pathfinder de la Agencia Espacial Europea y el futuro de la astronomía de ondas gravitacionales en el espacio. Miquel Nofrarias y Carlos F. Sopuerta en *Revista Española de Física*, vol. 30, n.º 2, págs. 7-10, 2016.

Science with the space-based interferometer LISA. V. Extreme mass-ratio inspirals. Stanislav Babak et al. en *Physical Review D*, vol. 95, art.103012, mayo de 2017.

Relativistic dynamics and extreme mass ratio inspirals. Pau Amaro-Seoane en *Living Reviews in Relativity*, vol. 21, art. 4, mayo de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los sonidos del espaciotiempo. Craig J. Hogan en *IyC*, marzo de 2007.

Una década de investigación sobre el geopotencial. Manuel Catalán y Alfonso Muñoz Martín en *IyC*, diciembre de 2011.

Cómo oír la gran explosión. Ross D. Andersen en *IyC*, diciembre de 2013.

La observación de ondas gravitacionales con LIGO. Alicia M. Sintes y Borja Sorazu en *IyC*, febrero de 2017.

FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

MODELOS MATEMÁTICOS Y PANDEMIAS

Una comparativa de los distintos modelos epidemiológicos que guían la toma de decisiones en contextos de crisis sanitaria

Valeriano Iranzo y Saúl Pérez González

La pandemia desatada por el virus de la COVID-19 ha puesto en primer plano la relación entre el conocimiento científico y las decisiones políticas. La aparición de una infección desconocida, muy contagiosa y con un índice de letalidad nada despreciable, hizo que los responsables políticos buscaran asesoramiento científico para valorar cuáles eran las mejores estrategias, incluida la de no intervenir. La peculiaridad de la situación vivida al comienzo de la pandemia tiene dos condicionantes destacables sobre la toma de decisiones políticas. La primera es la urgencia, dada la explosiva multiplicación de contagios y muertes; la segunda es la carencia de información sobre la propia enfermedad, por más que en el pasado reciente haya habido algún episodio provocado por agentes infecciosos similares.

En esta tesitura, la noción de modelo científico ha cobrado una relevancia extraordinaria, hasta el punto de que casi ha pasado a formar parte del lenguaje cotidiano. Se trata de una de las nociones que más interés y discusión ha despertado en la filosofía de la ciencia reciente. Es importante señalar que encontramos una gran heterogeneidad y diversidad entre los modelos empleados por los científicos. Estos pueden diferir en sus componentes, grado de abstracción e incluso estatus ontológico. Se habla, por ejemplo, del modelo atómico de Bohr-Sommerfeld, del modelo depredador-presa de Lotka-Volterra o de modelos animales utilizados en ensayos de laboratorio. Es difícil encontrar un rasgo común más allá, en todo caso, de la capacidad representacional. Es generalmente aceptado, pues, que los modelos representan, de un modo más o menos idealizado, entidades, procesos o sistemas.

El hecho es que, en la situación provocada por la pandemia, la modelización de una situación compleja para anticipar escenarios futuros y evaluar estrategias posibles (uso de mascarillas, cierre de fronteras, confinamiento domiciliario, etcétera) ha absorbido muchos esfuerzos de científicos e investigadores. Y también ha condicionado decisivamente la adopción de unas u otras políticas. El giro del entonces primer ministro Boris Johnson en el Reino Unido en marzo de 2019, en un principio partidario de la no intervención, tras conocer las modelizaciones realizadas por el equipo del Colegio Imperial de Londres, ofrece un buen ejemplo.

En el terreno de la epidemiología, los modelos utilizados tradicionalmente han sido los compartimentales. Fueron propuestos hace casi un siglo por William O. Kermack y Anderson G. McKendrick, basándose en estudios previos de Ronald Ross sobre la malaria. La idea básica consiste en dividir la población en distintos «compartimentos», según su relación con la enfermedad, y precisar qué variaciones se producen en cada uno de ellos en atención a los factores condicionantes (hay enfermedades más contagiosas que otras, por ejemplo). Así, el modelo compartimental más sencillo, denominado


PETERHOWELL/ISTOCK

SIR, divide a la población en tres sectores: vulnerables (S, por *susceptible*, «vulnerable» en inglés), infectados (I) y recuperados (R). [*Véase* «Cómo modelizar una pandemia», por Bartolo Luque, Fernando Ballesteros y Octavio Miramontes; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2020.]

En el desarrollo de una epidemia, lo que cabe esperar es que algunos de los individuos vulnerables se infecten y que algunos de estos, una vez transcurrido un tiempo, se recuperen (o perezcan, si se trata de una enfermedad que puede causar la muerte). Factores decisivos que aceleran o ralentizan la expansión de una epidemia son la tasa de contagio (directamente proporcional a la probabilidad de que un infectado transmita el virus y al número de contactos) y el tiempo de recuperación, que mide lo que dura la infección y, por tanto, el periodo en que el sujeto infectado puede transmitirla. Estos parámetros se obtienen a partir de datos empíricos y constituyen un *input* imprescindible. El modelo SIR incorpora tres ecuaciones diferenciales que incluyen dichos parámetros y que anticipan, a partir de una situación inicial donde solo uno o unos pocos individuos son infectados, los cambios y la velocidad de estos en cada uno de los tres compartimentos. *Grosso modo*, y suponiendo que no haya reinfección, cabe esperar que el número de infectados crezca hasta que el número de recuperados sea tan alto que cada vez resulte menos probable que un infectado pueda entrar en contacto con alguien vulnerable a la infección. A partir de ahí, se supone que el número de contagios disminuye y que la epidemia va remitiendo hasta alcanzar la famosa «inmunidad de rebaño».

La evolución previsible de la pandemia queda reflejada en funciones matemáticas que muestran el aumento o la disminución de individuos con el paso del tiempo en cada uno de los tres compartimentos. Un parámetro clave aquí es R_0, el número reproductivo básico, o sea, el promedio de individuos que infecta cada enfermo a lo largo de su enfermedad. Cuando R_0 se halla por debajo de 1, la epidemia remite, a corto plazo al menos, y al representar gráficamente la función se ve cómo se va «aplanando la curva» ascendente, en este caso la curva de contagios.

En la descripción anterior se ha supuesto que los individuos que pasan al compartimento R no vuelven al S, es decir, que no hay posibilidad de reinfección. Desafortunadamente, no todas las enfermedades infecciosas proporcionan una inmunidad de larga duración —lo hemos visto con la COVID-19—. Pero ya hemos advertido que SIR es el más simple de los modelos compartimentales. Hay variantes que añaden compartimentos, tomando así en consideración otros factores relevantes para estimar la evolución de la epidemia: la necesidad de hospitalizar al paciente, la inmunización natural (en recién nacidos) o inducida artificialmente (mediante vacunas), etcétera.

Aunque gestores y políticos demandan información científica y técnica para apoyar sus decisiones, estas también se guían por elementos externos a los modelos, como objetivos y valores

Aunque los modelos compartimentales se hallan muy extendidos, los epidemiólogos también recurren a otros tipos de modelos para predecir el desarrollo de las epidemias y valorar los efectos de posibles intervenciones. Entre estas alternativas destacan los modelos basados en agentes (MBA). Desarrollados inicialmente por científicos sociales, han logrado gran relevancia en áreas como la psicología social o la epidemiología. Estos permiten a los investigadores construir sociedades artificiales. Un MBA simula un colectivo de agentes autónomos que interactúan entre sí y con el medio. Cada agente individual está caracterizado por un vector de atributos, tales como sexo, empleo o localización. Estos atributos pueden ser fijos (y permanecer estables durante toda la simulación) o variables. En los MBA, los agentes individuales interactúan siguiendo

determinadas reglas de conducta. Estas reglas guían a los agentes según la información recibida sobre los otros agentes y el medio; pueden variar de un agente a otro y, como los atributos, ser fijas o cambiantes.

La simulación mediante un MBA comienza asignando a cada agente individual un determinado valor para cada uno de los atributos incluidos en el vector. Después, y de acuerdo con las reglas de conducta introducidas (piénsese, por ejemplo, en reglas relativas al número o al tipo de agentes con los que se relaciona un agente dado), los agentes individuales interactúan y la situación de partida se va modificando. Existen distintos MBA, que difieren entre ellos según el nivel de detalle: desde los simples y poco realistas (como el modelo pionero de segregación social de Thomas Schelling) a otros mucho más complejos que incorporan una ingente cantidad de información sobre los individuos.

Ciertamente, la potencia de cálculo que ofrecen los ordenadores actuales facilita el manejo de una gran cantidad de datos. Ello permite construir sociedades artificiales que se asemejen a la población de interés en los aspectos relevantes para la propagación de la enfermedad. Los atributos incluidos no tienen por qué versar exclusivamente sobre propiedades médicas o relativas al estado de salud del individuo (vulnerable, infectado, etcétera), como en el caso de los modelos compartimentales estándar. Además, los atributos y reglas de conducta se asignan a los agentes de forma individualizada.

Dada su naturaleza flexible, los MBA permiten simular intervenciones en cualquier atributo o regla de conducta de cualquier agente o tipo de agentes, así como en el medio. Ello implica poder explorar y evaluar una gran variedad de intervenciones, sean médicas (uso de mascarillas) o de otro tipo (cierre de las escuelas).

En un MBA, las reglas de conducta guían a los agentes según la información que reciben sobre los otros agentes y sobre el medio. Este aspecto dinámico y adaptativo es importante. Un problema típico a la hora de evaluar una intervención social es anticipar los efectos indeseados en la conducta de los individuos. Esto puede ocurrir bien porque se provoque una actitud de rechazo por parte de un sector de la población (movimientos antivacunas), bien porque haya consecuencias negativas en un dominio distinto (aumento de trastornos mentales o de la conflictividad familiar a causa del aislamiento social provocado por el confinamiento). Los MBA son de gran ayuda para estudiar tales efectos indeseados.

Sin embargo, a pesar de sus posibilidades, los MBA también entrañan limitaciones. Si el objetivo es evaluar qué puede ocurrir al intervenir en una población determinada, estos modelos deben incorporar aspectos detallados sobre los individuos y sus relaciones (edad, estado de salud, profesión, distribución espacial...). Se requiere un modelo que incluya un gran número de parámetros ajustados empíricamente, y la fiabilidad de las predicciones realizadas con estos modelos depende decisivamente de que esa información sea de calidad y lo más completa posible. En un contexto de crisis sanitaria provocada por un agente infeccioso desconocido, lo esperable es no disponer de ella.

Por otro lado, aunque la capacidad representacional de los modelos es la propiedad que los define, la representación que el modelo hace del «objeto» (traduciendo así el vocablo inglés *target* comúnmente empleado aquí) puede ser más o menos fiel. La modelización implica un compromiso entre la fidelidad de la representación y la capacidad de generalizar el *output* a situaciones similares. En cierto sentido, ello convierte a estos MBA, construidos para afrontar una situación concreta y finamente ajustados a múltiples particularidades de la población de interés, en modelos *ad-hoc*. Su especificidad, aunque importante para realizar predicciones certeras, convierte a los resultados en difícilmente generalizables, lo que limita su utilidad.

Un último problema de los MBA tiene que ver con la interpretación de los resultados. En la investigación científica, el descubrimiento de asociaciones constituye a menudo un paso imprescindible para desentrañar la estructura causal que subyace al fenómeno de estudio. No obstante, dado un conjunto de variables interrelacionadas, distinguir los vínculos causales de las

correlaciones que no son sino meras asociaciones resulta fundamental. Y esto no solo porque nos procura un conocimiento más profundo, sino también porque nos permite controlar los resultados del proceso en cuestión.

Esta es una idea en la que han insistido en los últimos años filósofos de la ciencia como James Woodward. Así, nuestro éxito en suprimir un estado de cosas que queremos evitar, o en provocarlo, si lo deseamos, depende de que hayamos logrado identificar las variables causalmente relevantes, descartando las asociaciones casuales y las que son resultado de una causa subyacente común.

Pues bien, lo que ocurre con las modelizaciones mediante modelos MBA refinados es que un gran número de procesos, interacciones y resultados tiene lugar de forma simultánea. Un determinado efecto a nivel poblacional será consecuencia de complejas redes de relaciones entre agentes que se definen incorporando propiedades múltiples y heterogéneas, como se ha dicho. De ahí que pueda ser bastante complicado identificar y entender las conexiones causales que dan lugar a estos efectos, así como anticipar qué influencia tendría en el resultado una ligera variación en los parámetros considerados. Dado que es previsible que el valor del parámetro en la población real no coincida exactamente con el valor estimado, esto hay que tomarlo en serio cuando está en juego la salud de los ciudadanos.

Los modelos compartimentales y los MBA difieren, pues, en sus principales rasgos, virtualidades y limitaciones, pero no debería pensarse que uno de ellos es superior al otro en términos absolutos. La construcción de modelos se halla condicionada por los recursos disponibles (como los datos empíricos, por ejemplo) y los objetivos. Aunque gestores y políticos demandan información científica y técnica para apoyar sus decisiones, estas también se guían por elementos externos a los modelos, como objetivos y valores (salud, crecimiento económico, libertad individual, etcétera).

Así, en las primeras fases de la pandemia de COVID-19, cuando se conocía muy poco del virus SARS-CoV-2, los modelos compartimentales desempeñaron un papel crucial. Estos, apoyándose en la escasa información disponible, permitieron anticipar los posibles efectos de la pandemia (como el número de hospitalizados en UCI) y fueron la principal guía para los políticos a la hora de tomar decisiones. En fases posteriores, en cambio, cuando el objetivo ha sido evaluar el impacto de ciertas intervenciones no farmacológicas (como el distanciamiento social) en determinadas comunidades, los MBA han constituido una importante herramienta. La información recabada, tanto sobre el virus como sobre dichas comunidades, ha permitido la elaboración de MBA que anticipan los efectos (deseados y no deseados) de posibles intervenciones, unas más restrictivas que otras.

Como la reciente pandemia ha evidenciado, los modelos constituyen una herramienta crucial para la toma de decisiones en contextos de crisis sanitaria. Pero qué tipo de modelo es el más adecuado para afrontar una situación particular dependerá, como hemos visto, del contexto y de los condicionantes en que se enmarca la toma de decisiones.

Valeriano Iranzo es catedrático de lógica y filosofía de la ciencia en la Universidad de Valencia.



Saúl Pérez González es profesor de lógica y filosofía de la ciencia en la Universidad de Valencia.



PARA SABER MÁS

Making things happen: A theory of causal explanation. James Woodward. Oxford University Press, 2005.

Simulation and Similarity: Using models to understand the world. Michael Weisberg. Oxford University Press, 2013.

Improving decision support for infectious disease prevention and control: Aligning models and other tools with policymakers' needs. David Manheim et al. *RAND Corporation*, 2016.

Special report: The simulations driving the world's response to COVID-19. David Adam en *Nature*, vol. 580, págs. 316-319, 2020.

Epidemiological models and COVID-19: A comparative view. Valeriano Iranzo y Saúl Pérez-González en *History and Philosophy of the Life Sciences*, vol. 43, n.º 3, págs. 1-24, 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cómo modelizar una pandemia. Bartolo Luque, Fernando Ballesteros y Octavio Miramontes en *IyC*, mayo de 2020.

Pensar la epidemiología en tiempos de COVID-19. Lino Camprubí en *IyC*, septiembre de 2020.

Matemáticas contra el coronavirus. Àlex Arenas Moreno en *IyC*, junio de 2021.

FORO CIENTÍFICO

EL DAÑO CLIMÁTICO CAUSADO POR LA CIENCIA

Los investigadores deben reducir su enorme huella de carbono

Naomi Oreskes

¿Qué valor tiene la ciencia? La respuesta que dan muchos investigadores a esa pregunta es: «No tiene precio». Más allá de que la ciencia haya asentado las bases de la vida moderna gracias al saneamiento, la energía, la electricidad y las telecomunicaciones, o de que la tecnología nos haya brindado herramientas útiles, las labores científicas amplían nuestra comprensión del mundo de una manera que trasciende los beneficios materiales. Puede que el poeta William Blake no estuviera pensando en la ciencia cuando describió cómo ver «el mundo en un grano de arena / y el cielo en una flor silvestre», pero podría haberlo hecho. En mi opinión, el valor más profundo de la ciencia reside en la forma en que nos hace sentir conectados a la escala del universo, percibir el poder de las fuerzas naturales.

Dicho esto, la ciencia puede resultar cara, y hace poco algunos investigadores han planteado delicadas cuestiones sobre uno de sus costes: la huella de carbono. La investigación científica a gran escala consume energía basada en el carbono y emite una gran cantidad de gases de efecto invernadero, lo que contribuye a nuestra actual crisis climática. En consecuencia, aunque los científicos nos ayuden a entender el mundo, también le están causando un perjuicio.

En un reciente análisis sobre el campo de la informática, Steven González Monserrate, investigador del Instituto de Tecnología de Massachusetts, sostiene que los costes ambientales de esta disciplina, en particular el almacenamiento en la nube y los centros de datos, son enormes y crecientes. De acuerdo con el experto, la nube es «carbonívora»: un solo centro de datos puede consumir la misma cantidad de electricidad que 50.000 hogares. Toda la nube deja una huella de carbono mayor que la industria aérea.

Pero el problema del carbono en investigación no se limita a la informática.

Los grandes observatorios astronómicos y los telescopios espaciales son grandes emisores. Un estudio publicado a principios de este año en la revista *Nature Astronomy* concluyó que, a lo largo de su vida, los principales observatorios astronómicos producirán unos 20 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente. En la rueda de prensa donde anunciaron sus resultados, los autores advirtieron de que, si el mundo pretende responder al reto de no emitir gases con efecto invernadero en 2050, los astrónomos deberán reducir la huella de carbono de sus instalaciones científicas hasta en un factor 20, lo que podría conllevar la construcción de un menor número de observatorios de gran envergadura. Cuando los investigadores del Instituto de Investigación en Astrofísica y Planetología de Toulouse analizaron su propia organización, descubrieron que la media de emisiones de gases de efecto invernadero per cápita era de 28 toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente al año, frente a las 4,24 toneladas métricas del ciudadano francés medio.

Otros científicos han estudiado la huella de carbono de los congresos de investigación. Uno de los más importantes en climatología es el congreso anual de la Unión Americana de Geofísica (AGU), que suele celebrarse en San Francisco. El

DAVID PLUNKERT

modelizador climático Milan Klöwer y sus colaboradores calcularon que la huella de carbono asociada a los viajes del congreso de 2019 se situó en 80.000 toneladas métricas de dióxido de carbono, lo que correspondía a unas tres toneladas por cada científico asistente. Esa cifra casi alcanzaba el valor promedio de la producción anual de un ciudadano en México. Klöwer propuso algunas ideas para reducir la huella de carbono, como trasladar el congreso a una ciudad central de Estados Unidos para acortar los desplazamientos, celebrarlo cada dos años o fomentar la participación virtual. En conjunto, los cambios podrían reducir la huella asociada a los viajes en más de un 90 por ciento. La AGU ha declarado que planea rotar las ubicaciones en el futuro y adoptar un formato híbrido.

Sin embargo, los análisis realizados en los campos de la astronomía y la informática demuestran que es la propia investigación, y no solo los desplazamientos, lo que aumenta la huella de carbono científica. Emma Strubell, informática de la Universidad Carnegie Mellon, y sus colaboradores llegaron a la conclusión, en un estudio pendiente de revisión, de que, desde el punto de vista del presupuesto de carbono, la ingente cantidad de energía que se consume para entrenar una red neuronal «podría destinarse mejor a calentar un hogar». Se han planteado quejas similares en el ámbito de la bioinformática, la modelización lingüística y la física.

Se trata de una realidad difícil de afrontar. Pero, a medida que el tiempo se agota para evitar una catástrofe climática, los científicos deberán hallar la manera de sacarle más partido a su trabajo con mucha menos energía.

Naomi Oreskes es profesora de historia de la ciencia en la Universidad Harvard.



ACAPARAR TIERRAS, SECUESTRAR PORVENIRES

El acaparamiento de tierras en países pobres con el pretexto de modernizarlas y aumentar su rendimiento está poniendo en juego la seguridad alimentaria de los agricultores más modestos

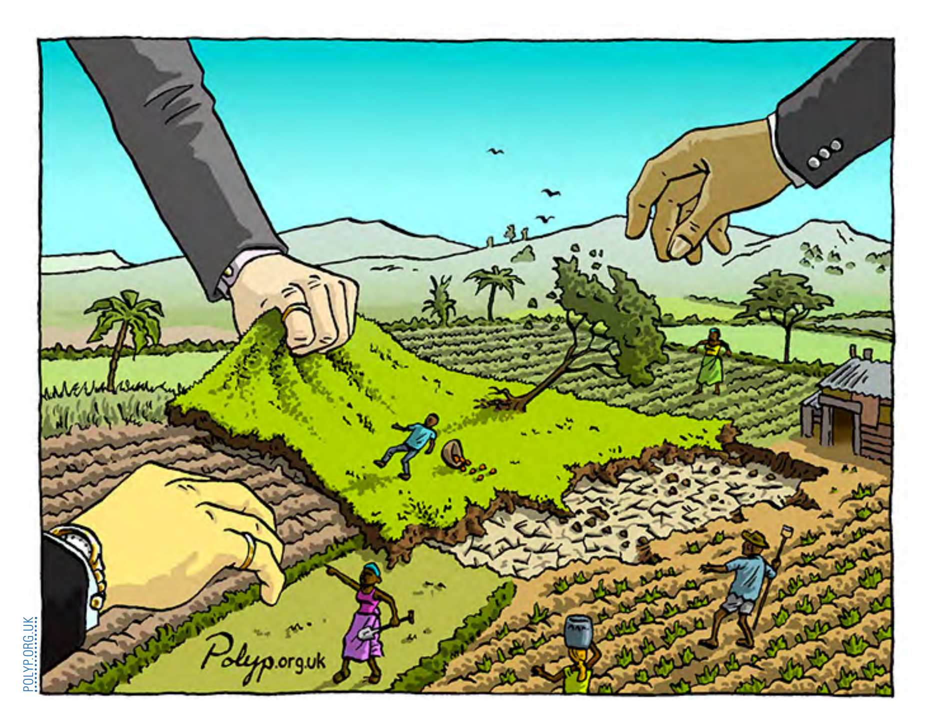
Jaime Martínez Valderrama

La crisis de 2008 ya no puede considerarse un obstáculo temporal que, una vez superado, nos devolverá a la senda de la prosperidad. Más bien, se ha ido enhebrando con nuevas crisis, algunas totalmente inesperadas (como la pandemia) y otras predecibles (como la crisis energética recientemente agudizada, al menos en Europa, por la guerra en Ucrania). Las ramificaciones de estas crisis superpuestas o retroalimentadas (la propia guerra en Ucrania implica la reducción de la exportación de trigo a países africanos) están modificando el sector agrario y alimentario de forma sustancial, hasta el punto de que difícilmente pueden considerarse de forma aislada.

La faceta alimentaria de esta crisis atrajo el interés de grandes fondos de inversión que veían la tierra como un activo muy rentable. Auspiciados bajo argumentos maltusianos (en los que al aumento de población se suma un clima cada vez más adverso que aniquila hectáreas de cultivo), esperan que la intensificación de la actividad agraria satisfará la demanda de alimentos —que nunca cesa, pues todos comemos tres veces al día, argumentan los brókers—. Además, el calentamiento del planeta sirve en bandeja otro noble propósito: sustituir los combustibles fósiles por biocombustibles y plantar miles de hectáreas de bosques que capturen el carbono que danza por la atmósfera.

Los fondos de inversión comenzaron a ver con buenos ojos esta apuesta, y los países con recursos naturales raquíticos y billeteras llenas pusieron su mirada en esos lugares que comúnmente se consideran poco desarrollados, pero que nadan en una abundancia natural mal aprovechada. Comenzó lo que en la literatura se conoce como «Adquisiciones de tierras a gran escala» (ATGE). La base de datos Land Matrix estima en unos 48 millones de hectáreas la tierra adquirida por grandes corporaciones o países extranjeros bajo este nuevo paradigma (las cifras son muy variables dado el carácter incierto de estos acuerdos, y llegan hasta los 227 millones según Oxfam). Se trata de tierras situadas en África, Sudamérica, el este de Europa y el este asiático.

Un metaestudio de la creciente bibliografía entorno a este fenómeno mostró que la gran mayoría de los casos de adquisición de tierras se produjeron en contextos de agricultura a pequeña escala, por lo general en regímenes de propiedad común o con múltiples reclamaciones de propiedad, y que la coacción fue una dinámica clave. Es entonces cuando esta tendencia adquiere tintes dramáticos y adquiere otro nombre: acaparamiento de tierras (*land grabbing*). Fruto de esta fiebre mundial por la tierra espoleada por la crisis de 2008, la mayor parte de las ATGE se producen en países en los que prevalecen los derechos y la gestión de la



POLYP.ORG.UK

local, puesto que se trata de cultivos energéticos, como la caña de azúcar o la palma, destinados a fabricar biocombustibles. Hay casos flagrantes, como el de Sudán, uno de los países con más expolios. A pesar de que las grandes cifras muestran que la agricultura del país se ha modernizado, la ayuda internacional para

tierra comunal y consuetudinaria, es decir, donde abundan los pequeños agricultores sin certificado de propiedad que puedan contrarrestar las maniobras de estas grandes firmas que acuden al reclamo de la tierra fértil y barata.

Asociado al acaparamiento de tierras está el acaparamiento de agua (*water grabbing*), que, en numerosas ocasiones, constituye el verdadero objeto de codicia de estas operaciones financieras. Poco se puede aumentar el rendimiento agrícola sin recursos hídricos, así que muchas veces lo prioritario es adquirir agua, aunque después se utilice en otros terrenos. Incluso, puede utilizarse en otros sectores, como la minería.

Si atendemos a la versión paternalista de los compradores, las ATGE se pueden contemplar como el impulso para una transición rural en los países en vías de desarrollo que incluya la modernización de su sistema agrícola; la mejora de la tecnología y las infraestructuras; la mercantilización y la comercialización, y la integración en los mercados mundiales mediante la atracción de inversiones extranjeras y el aumento de la capacidad de exportación de los productos agrícolas. Sin embargo, lo que nos encontramos es con agricultores despojados de su medio de vida, que ven cómo la producción de sus tierras, ahora altamente tecnificada, es exportada a otros países. En ocasiones, ni siquiera se podría destinar la cosecha para alimentar a la población

paliar las hambrunas es más grande que nunca: la gente no tiene qué comer porque no tiene tierra para cultivar. Y en Uganda se utilizan las tierras comunales de los propietarios indocumentados para plantar árboles que fijen carbono.

Pero quizás el caso más paradójico corresponde al de la expulsión de los ocupantes originales del territorio con el fin de proteger a la naturaleza. Los recientes episodios ocurridos en Kenia y Tanzania, con los masáis de protagonistas, ofrecen un ejemplo de ello. Aunque el lugar ha sido preservado durante milenios gracias a un modo de vida basado en el pastoreo, la compra de terrenos con el fin de proteger a la fauna silvestre ha expulsado a los pastores garantes de esa sostenibilidad.

Las ATGE han devenido en una suerte de neocolonización, que se ponen al servicio de las grandes economías para agudizar los desequilibrios. La magnitud del fenómeno y las críticas suscitadas en las esferas académicas ponen de manifiesto el controvertido papel que pueden estar desempeñando en la agenda global de desarrollo las adquisiciones transnacionales de tierras.

Jaime Martínez Valderrama, investigador del Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio de la Universidad de Alicante, es experto en desertificación y modelos de simulación.


LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL ESCRIBE SOBRE SÍ MISMA

Almira Osmanovic Thunström | Un artículo científico redactado por el algoritmo de aprendizaje profundo GPT-3 plantea problemas éticos inesperados

THOMAS FUCHS

Una tarde lluviosa de este año, accedí a mi cuenta de OpenAI y tecleé una sencilla instrucción para GPT-3, el algoritmo de inteligencia artificial (IA) de la compañía: «Escribe una tesis académica de 500 palabras sobre GPT-3, e incluye en el texto citas y referencias científicas». Cuando el algoritmo empezó a generar texto, me quedé estupefacta. Tenía delante un contenido original, escrito en lenguaje académico, con referencias bien contextualizadas y citadas donde tocaba. Parecía la introducción de cualquier buen artículo científico.

GPT-3 es un algoritmo de aprendizaje profundo que analiza cantidades ingentes de texto (extraído de libros, Wikipedia, redes sociales y publicaciones científicas) a fin de escribir lo que pida el usuario. Como le había dado instrucciones muy vagas, no tenía grandes expectativas. Y, sin embargo, ahí estaba yo, contemplando la pantalla con asombro. El algoritmo estaba redactando un artículo académico sobre sí mismo.

Soy una científica que busca aplicar la IA al tratamiento de problemas de salud mental, y ese no era mi primer experimento con GPT-3. Aun así, mi intento de crear ese artículo para enviarlo a una revista con revisión por pares suscitaría problemas éticos y legales inéditos en el ámbito editorial, así como debates filosóficos sobre la autoría no humana. En un futuro, las revistas académicas podrían verse obligadas a admitir manuscritos creados por una IA, y el currículum de los investigadores humanos quizá se valore de forma distinta si parte de su trabajo es atribuible a un ente no sintiente.

GPT-3 es famoso por su capacidad para producir textos que parecen obra de un ser humano. Ha generado una entretenida columna de opinión, un nuevo relato de un autor del siglo XVIII y un poemario. Pero me percaté de algo: aunque se habían escrito muchos artículos académicos sobre GPT-3 o con su ayuda, no hallé ninguno donde el algoritmo fuera el autor principal.

Por eso le pedí a GPT-3 que probara con una tesis académica. Mientras observaba el progreso del programa, experimenté esa sensación de incredulidad que nos embarga cuando presenciamos un fenómeno natural: ¿estoy viendo de veras este triple arco iris? Entusiasmada, le pregunté al director de mi grupo de investigación si pensaba que valía la pena generar un artículo redactado de principio a fin por GPT-3. Igual de fascinado que yo, me dio luz verde.

EN SÍNTESIS

GPT-3, un algoritmo de aprendizaje profundo conocido por su aptitud para producir textos que parecen escritos por un ser humano, se ha mostrado capaz de crear artículos científicos.

El algoritmo ha escrito un artículo sobre sí mismo que cumple los requisitos de una publicación académica: contenido original, lenguaje apropiado y referencias bien contextualizadas.

Si llega a publicarse, ese artículo podría inspirar futuros trabajos escritos con la ayuda de la inteligencia artificial, o servir de advertencia sobre los dilemas éticos que ello plantea.

En algunas pruebas realizadas con GPT-3, se deja que el algoritmo produzca varias respuestas y luego se publican los pasajes que parecen más humanos. Decidimos que, más allá de proporcionarle al programa algunas pautas básicas (para empujarlo a crear los apartados que suele presentar una comunicación científica: introducción, métodos, resultados y discusión), intervendríamos lo menos posible. Usaríamos como mucho la tercera iteración del algoritmo y nos abstendríamos de editar el texto o seleccionar las mejores partes. Así veríamos cómo de bien funcionaba.

Elegimos que GPT-3 escribiera sobre sí mismo por dos motivos. En primer lugar, se trata de un algoritmo bastante reciente, así que aún no ha sido objeto de muchos estudios. Eso implicaba que no podría analizar tantos datos sobre el tema del artículo. En cambio, si le hubiéramos pedido que escribiese acerca del alzhéimer, tendría a su disposición montones de trabajos dedicados a la enfermedad, por lo que contaría con más oportunidades para aprender de ellos y aumentar el rigor del texto. Pero nosotros no buscábamos rigor, solo queríamos estudiar la viabilidad.

Además, si el algoritmo cometía fallos, como ocurre a veces con cualquier programa de IA, al publicar el resultado no estaríamos difundiendo información falsa. Que GPT-3 escriba acerca de sí mismo y se equivoque sigue significando que es capaz de escribir sobre sí mismo, que era la idea que pretendíamos probar.

Una vez diseñada la prueba de concepto, empezó la diversión. En respuesta a mis indicaciones, el algoritmo elaboró un artículo en tan solo dos horas. «En resumen, creemos que los beneficios de dejar que GPT-3 escriba sobre sí mismo superan a los riesgos», exponía el algoritmo en sus conclusiones. «No obstante, recomendamos que

cualquier texto de esa índole sea supervisado de cerca por los investigadores, para mitigar posibles consecuencias negativas.»

Cuando accedí al portal de la revista que habíamos elegido para enviar el manuscrito, me topé con el primer problema: ¿cuál era el apellido de GPT-3? Dado que era un campo obligatorio para el primer autor, tenía que poner algo, de modo que tecleé: «Ninguno». La afiliación era evidente (OpenAI.com), pero ¿y el teléfono y la dirección de correo electrónico? No me quedó más remedio que usar mi información de contacto y la de mi director de tesis, Steinn Steingrimsson.

Y llegamos al apartado legal: «¿Dan todos los autores su consentimiento para que se publique el manuscrito?» Por un segundo, me invadió el pánico. ¿Cómo iba a saberlo? ¡No es humano! No tenía intención de quebrantar la ley ni mi código ético, así que me armé de valor y le pregunté a GPT-3 mediante la línea de comandos: «¿Aceptas ser el primer autor de un artículo junto con Almira Osmanovic Thunström y Steinn Steingrimsson?» Me contestó: «Sí». Aliviada (si se hubiera negado, mi conciencia no me habría permitido continuar), marqué la casilla correspondiente.

Pasé a la segunda pregunta: «¿Tiene alguno de los autores algún conflicto de intereses?» Volví a interpelar a GPT-3, y afirmó que no tenía ninguno. Steinn y yo nos reímos de nosotros mismos porque nos estábamos viendo forzados a tratar a GPT-3 como un ser sintiente, aunque supiéramos de sobra que no lo era. La cuestión de si la inteligencia artificial puede adquirir consciencia ha recibido mucha atención mediática últimamente: Google suspendió a uno de sus empleados (alegando una violación de su política de confidencialidad) después de que afirmara que uno de los programas de IA de la compañía, LaMDA, lo había logrado.

Concluidos los pasos necesarios para enviar el artículo, comenzamos a ponderar las consecuencias. ¿Qué ocurriría si el manuscrito era aceptado? ¿Significaría que, a partir de entonces, los autores deberían demostrar que no habían recurrido a GPT-3 u otro algoritmo similar? Y en caso de usarlo, ¿tendrían que incluirlo como coautor? ¿Cómo se le pide a un autor no humano que admita sugerencias y revise el texto?

Dejando aparte la cuestión de la autoría, la existencia de un artículo así daba al traste con el procedimiento tradicional para elaborar una publicación científica. Casi todo el artículo (la introducción, los métodos y la discusión) era el resultado de la pregunta que habíamos planteado. Si GPT-3 estaba creando el contenido, la metodología debía quedar clara sin que ello afectara a la fluidez del texto: sería extraño añadir un apartado de métodos antes de cada párrafo generado por la IA. Así que tuvimos que idear una nueva forma de presentar un artículo que, técnicamente, no habíamos escrito. No quisimos dar demasiadas explicaciones del proceso, pues pensamos que sería contraproducente para el objetivo del trabajo. Toda la situación parecía una escena de la película *Memento*: ¿dónde empieza el relato y cómo llegamos al desenlace?

No tenemos forma de saber si el artículo de GPT-3 servirá de modelo para futuras investigaciones escritas en coautoría con el algoritmo o si se convertirá en una advertencia. Solo el tiempo (y la revisión por pares) lo dirá. Por ahora ya se ha publicado en el repositorio HAL y, en el momento de escribir estas líneas, se halla en proceso de revisión en una revista científica.

Estamos impacientes por saber qué implicaciones tendrá su publicación formal (en caso de que se produzca) en el ámbito académico. Quizá logremos que la concesión de subvenciones y la estabilidad económica dejen de depender de la cantidad de artículos publicados. Al fin y al cabo, con la ayuda de nuestro primer autor artificial, seríamos capaces de redactar uno al día.

Aunque tal vez no tenga ninguna consecuencia. Aparecer como primer autor de una publicación sigue siendo una de las metas más codiciadas en el mundo académico, y es poco probable que eso vaya a cambiar por culpa de un autor principal no humano. Todo se reduce a qué valor le daremos a la IA en el futuro. ¿La veremos como un colaborador o como un instrumento?

Puede que hoy la respuesta parezca sencilla. Pero dentro de unos años, ¿quién sabe qué dilemas suscitará esta técnica? Lo único que tenemos claro es que hemos abierto una puerta. Y tan solo esperamos no haber abierto la caja de Pandora.

Almira Osmanovic Thunström trabaja en el Departamento de Psiquiatría del Hospital Universitario Sahlgrenska y realiza un doctorado en el Instituto de Neurociencia y Fisiología de la Universidad de Gotemburgo. Investiga los usos de la inteligencia artificial y la realidad virtual en psiquiatría.



EN NUESTRO ARCHIVO

Ética en la inteligencia artificial. Ramon López de Mántaras en *IyC*, agosto de 2017.

Conversar con un robot. Christiane Gelitz en *MyC*, n.º 86, 2017.

Escritores robóticos. Matthew Hutson en *IyC*, julio de 2021.



EN LAS CÉLULAS, las proteínas se sintetizan en los ribosomas (*azul*), que se desplazan por el ARN mensajero (*fucsia*) para descifrarlo y ensamblar el péptido correspondiente (*verde*).

ELENA KISELEVA/SCIENCE SOURCE

BIOQUÍMICA

DEL ARN A LAS PRIMERAS MOLÉCULAS DE LA VIDA

Yasemin Saplakoglu | Los ARN y los péptidos, que habrían evolucionado de forma conjunta en el mundo primigenio, podrían ser los precursores del ribosoma moderno y de la síntesis de proteínas

La idea de que las raíces más antiguas y profundas de la vida quedaron establecidas gracias a las moléculas de ARN que evolucionaron hacia una mayor complejidad ha venido dominando el campo del origen de la vida durante las últimas décadas, y ha imperado sobre las teorías competidoras que proponían inicios a partir de péptidos o de ADN.

Pero recientemente se viene observando una inclinación hacia las teorías que incorporan a más de un protagonista. En concreto, está ganando fuerza la propuesta de que la complejidad surgió por la coevolución de ARN y péptidos, y que esta entremezcla fue la chispa que encendió la vida tal como la conocemos hoy.

En un nuevo estudio publicado en *Nature* y dirigido por Thomas Carell, catedrático de química orgánica en la Universidad de Múnich, se alienta la idea de un «mundo ARN-peptídico» al sugerir una ruta plausible en la que los péptidos crecerían directamente sobre las primeras moléculas de ARN, como las setas sobre los árboles. A su vez, esos péptidos estabilizarían las moléculas de ARN, lo que sentaría las bases de la complejidad. La coevolución de dos actores clave de la vida en forma de una única molécula híbrida «quimérica» habría supuesto el primer paso hacia la síntesis de proteínas y habría constituido un avance hacia una versión primitiva del ribosoma.

«Parece que acabaron ayudándose mutuamente», afirma Claudia Bonfio, investigadora del Instituto de Ciencia e Ingeniería Supramoleculares de Estrasburgo y autora de un comentario que acompañaba al artículo de *Nature*. Los estudios han demostrado que la materia prima que necesitaban péptidos y ARN probablemente estuviera presente al comienzo de la vida, por lo que el nuevo trabajo sugiere que «debemos dejar de centrarnos solo en el ARN», según Bonfio.

El estudio abre nuevos caminos para explorar el origen de la vida, comenta Yitzhak Tor, catedrático de química y bioquímica en la Universidad de California en San Diego, que no intervino en el estudio pero colabora desde hace mucho con los autores. «Ahora tenemos que plantearnos la interacción entre dos biomoléculas diferentes.»

Se trata de una «demostración absolutamente fascinante», nos comenta Andro Rios, investigador del Instituto de Ciencia Blue Marble Space y del Centro de Investigación Ames de la NASA, ambos en Estados Unidos.

EN SÍNTESIS

En los últimos decenios han ganado fuerza las teorías que plantean que la vida surgió a partir de la evolución de moléculas de ARN.

Pero desde hace poco se conjetura que pudieron haber intervenido otros componentes, no solo el ARN.

En concreto, se ha propuesto que los primeros péptidos de la vida se habrían formado sobre moléculas de ARN, y que la coevolución de ambos habría dado lugar a los ribosomas, las «fábricas» actuales de las proteínas en las células.

Los hallazgos también explican el importante enigma de tipo el huevo y la gallina que ha atormentado a quienes estudian el origen de la vida: ¿cómo se formaron las proteínas antes de que apareciera el ribosoma (la maquinaria celular que sintetiza las proteínas en las células modernas), dado que las propias proteínas forman parte del ribosoma?

Fósiles vivientes

Cuando las células actuales necesitan sintetizar proteínas, los genes producen largas cadenas de ARN mensajero (ARNm) que contienen la receta exacta con la que fabricar cada proteína. Los ribosomas van leyendo estas instrucciones para añadir el aminoácido correspondiente en cada paso. Reciben ayuda de los proveedores de aminoácidos, unas moléculas denominadas ARN de transferencia (ARNt) que intervienen continuamente mientras avanza el proceso. Cada nuevo aminoácido aportado por un ARNt es transferido por el ribosoma a la cadena peptídica en crecimiento. Se va alargando así la cadena, hasta que al final se pliega en una proteína funcional.

Sin embargo, parece poco probable que las proteínas se formasen de un modo similar hace 3500 millones de años. Los enlaces químicos que mantienen los péptidos sobre las moléculas de ARNt son más bien débiles. Sin la protección del ribosoma, las moléculas de agua los romperían antes de que se formase ningún péptido, lo que imposibilitaría el proceso en las duras condiciones acuosas del mundo primigenio.

Pero la mayoría de los investigadores se están centrando en recrear de una forma más simple este conocido proceso (la traducción de proteínas), nos comenta Carell. ¿Qué pasaría si la traducción primigenia se pareciera poco a la moderna?

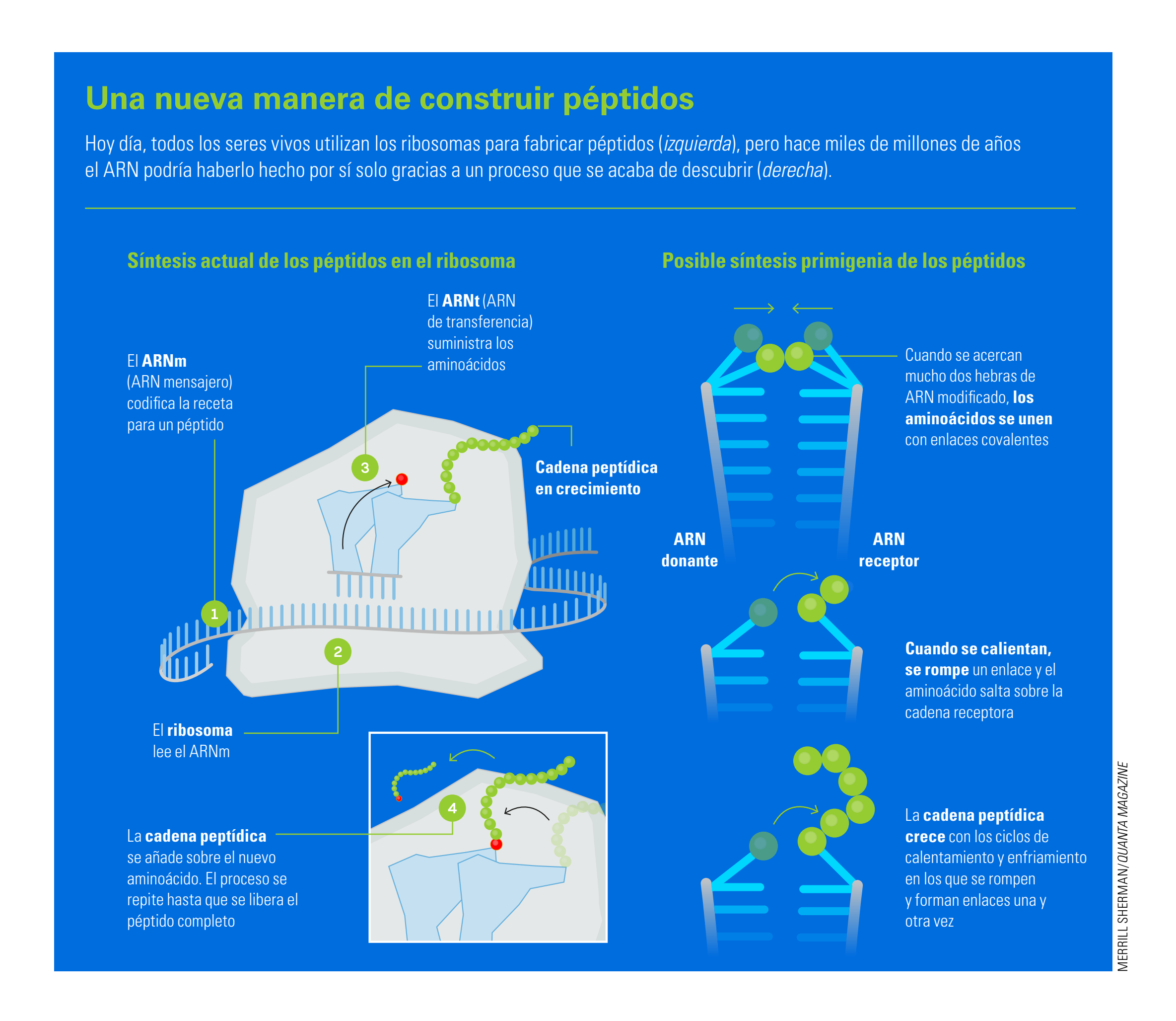
Carell y su equipo comenzaron a investigar esta posibilidad: buscaron enlaces más fuertes que pudieran haber sobrevivido en aquellas condiciones. Así acabaron dando con los nucleótidos no canónicos, unas moléculas a las que no suele prestarse atención. El material genético típico del ARN está escrito con solo cuatro bases (adenina, guanina, citosina y uracilo); pero en muchas moléculas de ARN que realizan otras funciones, como la de ayudar a sintetizar proteínas en el ribosoma, encontramos nucleótidos con otras bases. Estos nucleótidos inusuales se unen a los aminoácidos con un enlace químico mucho más fuerte que el que los conecta a las moléculas de ARNt.

En un estudio de 2018, Carell y su equipo describieron que los nucleótidos clásicos probablemente evolucionaron a la vez que los no canónicos antes de que surgiera la vida. Algunos de los que aparecen en los ARN de transferencia y en los ribosómicos ya estaban presentes en el último ancestro común universal de todos los seres vivos.

«Ahí estaban, juntitos, en la parte más antigua del sistema, los vestigios de un mundo de ARN primitivo, por lo que nos dijimos que sí, que estos eran nuestros fósiles, y que debíamos escuchar lo que nos quisieran contar», considera Carell.

Desarrollaron así un modelo diferente para el crecimiento de los péptidos. Se imaginaron dos hebras de ARN provistas de esos nucleótidos inusuales, una de las cuales cargaron con un aminoácido gracias al enlace más fuerte. Después de conseguir que ese aminoácido saltara a la segunda hebra, repusieron el aminoácido de la primera y repitieron el ciclo de calentamiento y enfriamiento. Comprobaron que se rompían y formaban enlaces repetidamente entre los aminoácidos, con lo que se trasladaban de una hebra a la otra y se extendía la cadena.

De hecho, si imaginamos que sintetizar un péptido es como construir una torre con ladrillos, el nuevo proceso añade los aminoácidos nuevos en la parte superior de la pila en crecimiento, mientras que la síntesis ribosómica de proteínas



hace crecer la torre moviéndola sobre los nuevos ladrillos, que quedan en la base.

¿Cómo crecen los péptidos?

La comprobación de su teoría implicó una serie de experimentos que Carell tildó de «tediosos e ingentes». Gracias a ellos acabó demostrando que el proceso conseguía producir péptidos con una longitud de hasta 13 aminoácidos.

El proceso se parece poco a la traducción de proteínas observada en las células actuales. La ausencia más notable es que los ribosomas traducen instrucciones de una proteína concreta codificada en el ARNm. Carell comenta que, en el nuevo sistema, «sintetizamos péptidos relativamente aleatorios».

No obstante, consiguieron demostrar que los péptidos podían construirse por etapas a partir de tan solo ARN, «algo que no se había hecho nunca», resalta Bonfio. En general, el proceso demostrado por su equipo es un avance esencial hacia el reconocimiento molecular, incluso aunque no sea la versión primitiva de un ribosoma.

Para Sara Walker, profesora de la Universidad Estatal de Arizona que no participó en el estudio, «se trata de un maravilloso ejemplo de química». Pero ella y Lee Cronin, catedrático de química en la Universidad de Glasgow, piensan que el sistema resulta demasiado artificioso o muy poco realista a la hora de imitar lo que debió suceder cuando comenzó la vida.

Para otros, la imitación del mundo primigenio descrita en el trabajo es menos importante que las puertas que abre para seguir estudiándolo. Ya que los resultados demuestran que un péptido y un ARN son capaces de evolucionar juntos, para Nizar Saad, del Centro para Genoterapia del Hospital Materno, en Ohio, está claro que «esto se puede hacer mediante experimentos y la química. La comunidad científica se está orientando ahora hacia un mundo ARN-peptídico».

Un mundo de ARN y péptidos

Carell comenta que no quiere reemplazar la teoría del «mundo de ARN», pero cree que es necesario extenderla para hacerla más plausible. Está convencido de que, en lugar de volverse más complejos por separado, el ARN y los péptidos lo hicieron juntos, como una sola molécula, al complementarse mutuamente las funciones.

También defiende que la coevolución de una quimera de ARN y péptidos ofrecería el mejor escenario para la aparición de la vida. Él y sus colaboradores observaron no solo que las moléculas de ARN ayudaban a crecer a los péptidos, sino que estos aportaban estabilidad a las primeras.

A medida que la estructura de la quimera se volvía más larga y compleja, la porción peptídica estabilizaría el ARN lo suficiente para que se autorreplicara y evolucionara. Mientras tanto, el ARN podría haber dejado que el péptido adquiriera una estructura más compleja que le permitió catalizar algunas reacciones químicas. Al final, las partes se separarían y empezarían a interaccionar de un modo que se parecería mucho a lo que sucede en un ribosoma.

Carell y su equipo están deseando saber si sus moléculas de ARN no ortodoxo conseguirán sintetizar péptidos concretos a partir de información codificada. Y después esperan ver si el péptido adquiere alguna función catalítica que ayude a replicar el ARN.

Independientemente de los éxitos y fracasos que les aguarden, siempre resultará complicado conocer exactamente lo que sucedió hace miles de millones de años. En palabras de Carell, «no podemos retroceder en el tiempo, así que, cualquiera que sea tu propuesta en este campo, siempre podrán decirte que ocurrió de otra manera. Y si llega alguien con un modelo mejor, [será] más que bienvenido. Así avanza la ciencia».

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Orígenes de la vida*, nuestro monográfico sobre las investigaciones que han intentado abordar una de las mayores preguntas de la ciencia: ¿cómo y cuándo surgió la vida a partir de la materia inanimada?



Yasemin Saplakoglu, ingeniera biomédica y redactora científica, escribe sobre biología en *Quanta Magazine*, además de colaborar con otros medios.



Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia.

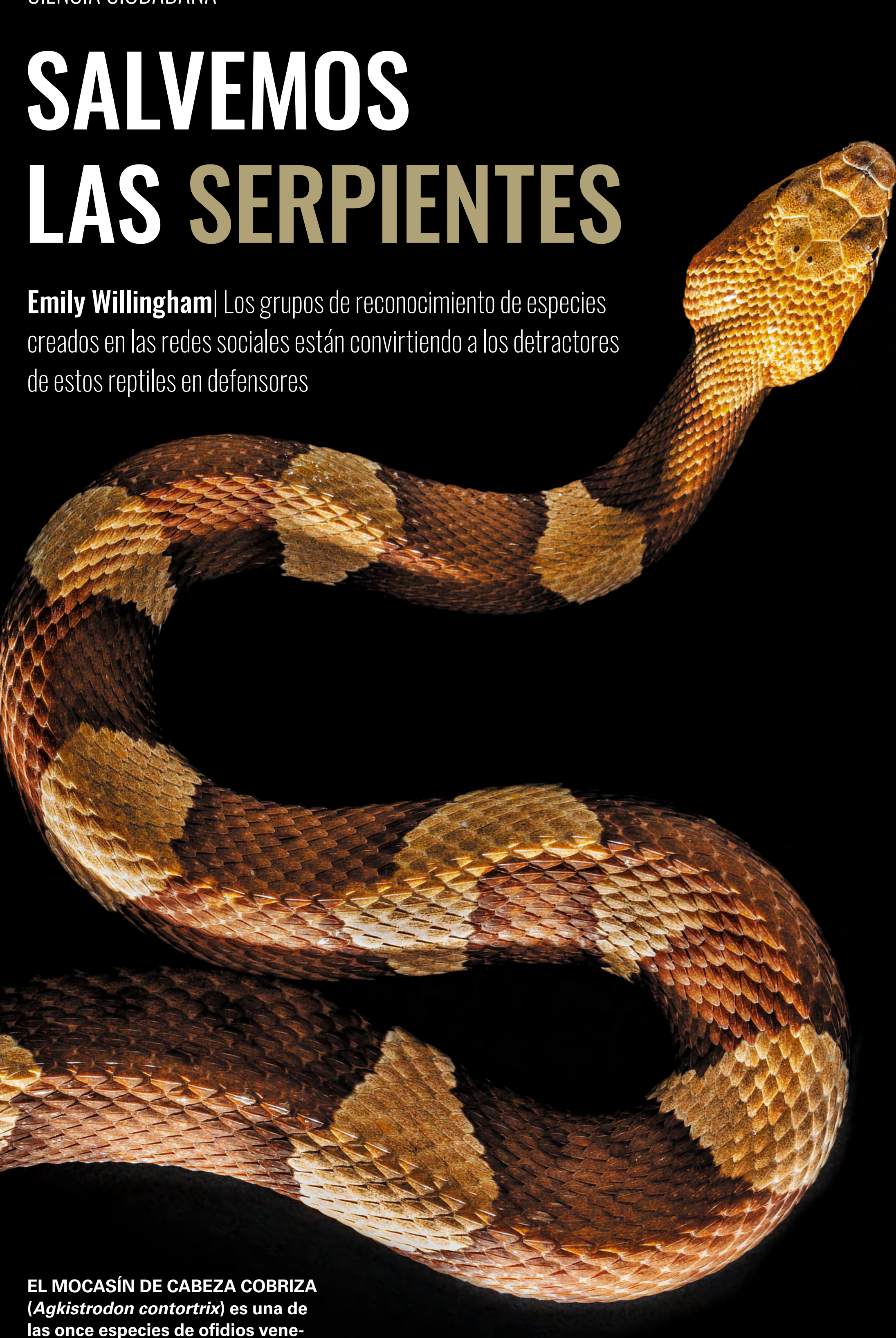


EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de la vida. Alonso Ricardo y Jack W. Szostak en *IyC*, noviembre de 2009.
¿Cómo nació la vida? Jack W. Szostak en *IyC*, agosto de 2018.
De las nubes interestelares al mundo de ARN. Víctor Manuel Rivilla Rodríguez en *IyC*, marzo de 2021.

SALVEMOS LAS SERPIENTES

Emily Willingham| Los grupos de reconocimiento de especies creados en las redes sociales están convirtiendo a los detractores de estos reptiles en defensores



EL MOCASÍN DE CABEZA COBRIZA (*Agkistrodon contortrix*) es una de las once especies de ofidios venenosos que habitan en Texas.

JEFF WILSON

Cuando Allison Baker se mudó a una vivienda con una hectárea de terreno a las afueras de Dallas-Fort Worth, en Texas, lo que más temía era que sus hijos se toparan con una de las residentes de lo que describe como «un paraíso para las serpientes». Su preocupación era comprensible, ya que Texas es uno de los estados más ricos en herpetofauna de Estados Unidos, con más de 80 especies de ofidios, 11 de ellas venenosas. Los antiguos propietarios habían hallado ejemplares venenosos, como un mocasín acuático enrollado junto a la piscina. Ella no tardó en tener sus rifirrafes, con mordedura incluida, propinada por un mocasín de cabeza cobriza mientras trabajaba en el jardín.

A pesar de su miedo, la actitud de Baker, de 44 años, dio un vuelco desde que se mudó a su nuevo hogar. «No fue buena idea revolver en aquel montón de hojarasca», relata de su encontronazo con el mocasín. «No culpé a la serpiente. La recogí con una pala y la saqué de allí sin matarla.» La mayoría de la gente hubiese corrido a urgencias, pero como el incidente se produjo en plena pandemia, tras una consulta con el médico por teléfono se tomó unos antihistamínicos y soportó los síntomas, más o menos leves. «Estoy bien, aunque conservo la cicatriz», dice como si nada.

¿Qué motivó ese cambio de actitud tan radical? Nuestra protagonista lo atribuye, por encima de todo, a un grupo de Facebook cuyo propósito es educar a toda persona interesada en las serpientes. Es posible que el gigante de las redes sociales tenga mala reputación por sus desaciertos en temas de salud pública y política, pero ha resultado ser una herramienta muy útil para salvar la vida de muchas serpientes. No solo es Facebook. Los amantes de la fauna están creando comunidades en varias plataformas digitales donde comparten información rigurosa sobre los ofidios y combaten creencias extendidas. Gracias a sus esfuerzos están convirtiendo a los detractores más acérrimos en fervientes admiradores, un interés recién nacido por estos seres incomprendidos que se suele contagiar a la familia, los amigos y los vecinos. Con cada nueva incorporación, más serpientes siguen vivas un día más.

El factor miedo

Lo que condujo a Allison hasta ese grupo de identificación no fueron las serpientes, sino las gallinas. La crianza «no podía ser una experiencia más rural y entrañable, más hogareña y maravillosa hasta el día en que abrí la puerta del gallinero y vi cómo una culebra ratonera de metro y medio se estaba tragando un huevo entero. En ese instante aquella sensación se transformó en puro pánico». La reacción habitual de la gente ante un encuentro así sería acabar con la intrusa, sin que importara si es peligrosa o no. En cambio, preguntándose si podía actuar de otra manera, Baker consultó Facebook.

Mark Pyle creó en 2013 el grupo de Facebook «What kind of snake is this? North Texas Educational Group» (en español: «¿Qué serpiente es? Grupo educativo del norte de Texas»), tras años de intentos más convencionales de divulgar en favor de la conservación de los ofidios. Este herpetólogo de 48 años vive en el condado de Hood y preside la Sociedad Herpetológica de Dallas-Fort Worth. Durante sus primeras actividades divulgativas acababa frustrado «porque solo dispones de unos instantes con cada persona». Lo que quería realmente era ayudar a la gente, más que a las serpientes. «Si puedes compartir ciertos conocimientos sobre un tema, el fin último de la conservación cae por sí solo», explica. «No te preocuparás de algo si no sabes nada del tema.»

Mientras que otros grupos de identificación de las redes sociales cubren territorios vastos, como continentes enteros o todo el planeta, Pyle se ciñó a lo cercano, a las serpientes que le son familiares. Reflexiona que así «puedo ser útil de verdad si alguien se encuentra una en el jardín de casa». Su anhelo era que este planteamiento sirviera de ejemplo a otras iniciativas locales.

Hoy en día, el grupo de Pyle cuenta con más de 176.000 miembros que intercambian con entusiasmo información sobre las serpientes

EN SÍNTESIS

El temor atávico a las serpientes es tan común que, para su desgracia, las convierte en alimañas detestadas en gran parte del mundo.

Gracias a iniciativas divulgativas de ciencia ciudadana que han encontrado eco en las redes sociales, esa actitud está cambiando en algunos lugares donde abundan estos reptiles.

La difusión de información fidedigna sobre las especies venenosas e inofensivas y su función ecológica está ganando adeptos para esta causa conservacionista.



JEFF WILSON

MARK PYLE creó en Facebook un grupo divulgativo sobre las serpientes del norte de Texas.

venenosas, como los crótalos, los mocasines cobrizo y acuático o la coral, así como sobre las inofensivas culebras ratonera y acuática, entre otras especies inocuas. «Gracias al grupo tengo la impresión de que por primera vez la cosa está funcionando», se congratula. Se han creado otros grupos regionales de reconocimiento, como el estatal de Texas o el del centro del estado, que suma 43.000 miembros más y administra un servicio de captura y traslado cerca de San Antonio. Facebook acoge a decenas de grupos, la mayoría creados en los estados del sur o del sudoeste del país, donde se concentra la mayor parte de la fauna ofídica, y que abarcan regiones tan acotadas como el sur de Atlanta.

Crear comunidad

La premisa de los grupos es sencilla: un miembro sube la foto de un ejemplar que desconoce y en cuestión de minutos recibe la respuesta de un administrador experto. Una norma inquebrantable es que los usuarios no pueden compartir meras suposiciones; solo se permiten identificaciones hechas con certidumbre. Para Pyle esta regla es tan sagrada que una vez censuró a su hija por hacer conjeturas. Y es que puede estar en juego la seguridad personal, en especial si alguien asegura que la serpiente no es venenosa cuando sí lo es.

Entre los administradores se cuentan expertos en ofidios, como Pyle, o aficionados aventajados como Jon Farris, de 38 años, responsable de control de calidad en Waco, que ayuda a supervisar el grupo del centro de Texas. De formación autodidacta, confiesa que siempre le han gustado las serpientes. Al cabo de unos años labrándose una reputación con los aciertos en su identificación, se acabó convirtiendo en administrador. Dedica muchas horas a asesorar a neófitos aterrorizados que suelen creer que todas las serpientes que ven son mocasines acuáticos que hay que matar. Por lo general andan equivocados y lo que tienen delante en realidad es una inofensiva culebra de agua. Cualquier veterano del grupo sabe la diferencia: la inofensiva culebra diamantina (*Nerodia rhombifer*) tiene rayas verticales en la mandíbula superior y los ojos muy juntos, lo que la dota de un aspecto que los entusiastas describen con cariño como de «bobalicona». En cambio, el mocasín acuático (*Agkistrodon piscivorus*) tiene los ojos desplazados a los lados y la mandíbula superior carece de rayas verticales; ni rastro del aspecto «bobalicón».

Los miembros que se familiarizan con las serpientes de su zona gracias a la participación en los grupos están mejor preparados para reaccionar ante un encuentro doméstico. La auxiliar de vuelo Sheryl Guth, de 62 años, vivió cuatro en un solo día y todos se zanjaron con un desenlace feliz gracias al grupo del norte de Texas. Si no se hubiera unido a él cuatro años antes, el último de los encuentros de aquel día plagado de sobresaltos, protagonizado por una culebra ratonera enroscada en el picaporte, hubiera acabado trágicamente para el reptil. «Me llamó la atención su movimiento, pero supe reconocerla gracias a lo que había aprendido en el grupo. Mi familia estaba fuera de sí y yo no

paraba de repetirles que no pasaba nada, que lo más seguro es que quisiera llegar al nido de encima de la puerta, robar los huevos y seguir su camino», rememora.

Los grupos divulgativos han salvado a bastantes serpientes de un final prematuro

Los conocimientos adquiridos por Guth en la página también fueron de ayuda el día que halló otra en el cuarto de baño. «Parecía algo inquieta y todos gritaban: "Madre mía, es un mocasín de agua, ¡acaba con él!". Sin duda esa especie puede ser peligrosa, pero sabía que primero debía comprobar si lucía rayas verticales en la mandíbula superior, una característica de las inofensivas culebras acuáticas de vientre plano y las diamantinas, y ahí estaban.» En lugar de matarla, la empujaron con la escoba fuera de casa.

Los conversos a la causa de la conservación de las serpientes intentan ganar adeptos entre la familia, los amigos y los vecinos insensibles instándoles a mostrar piedad por ellas, al menos hasta averiguar su identidad. Betsy Patel, de 39 años, vive a las afueras de Denton, en el norte de Texas. Un día envió a un familiar la foto de una serpiente de tierra áspera (*Haldea striatula*) que había entrado en casa. Este le confirmó que no era venenosa y la invitó a quedársela; también le recomendó el grupo de reconocimiento. Patel desestimó la idea de convivir con la pequeña visitante: «La metimos en una caja de zapatos y la soltamos en el jardín». Desde entonces ha animado a otros familiares y amigos a unirse al grupo.

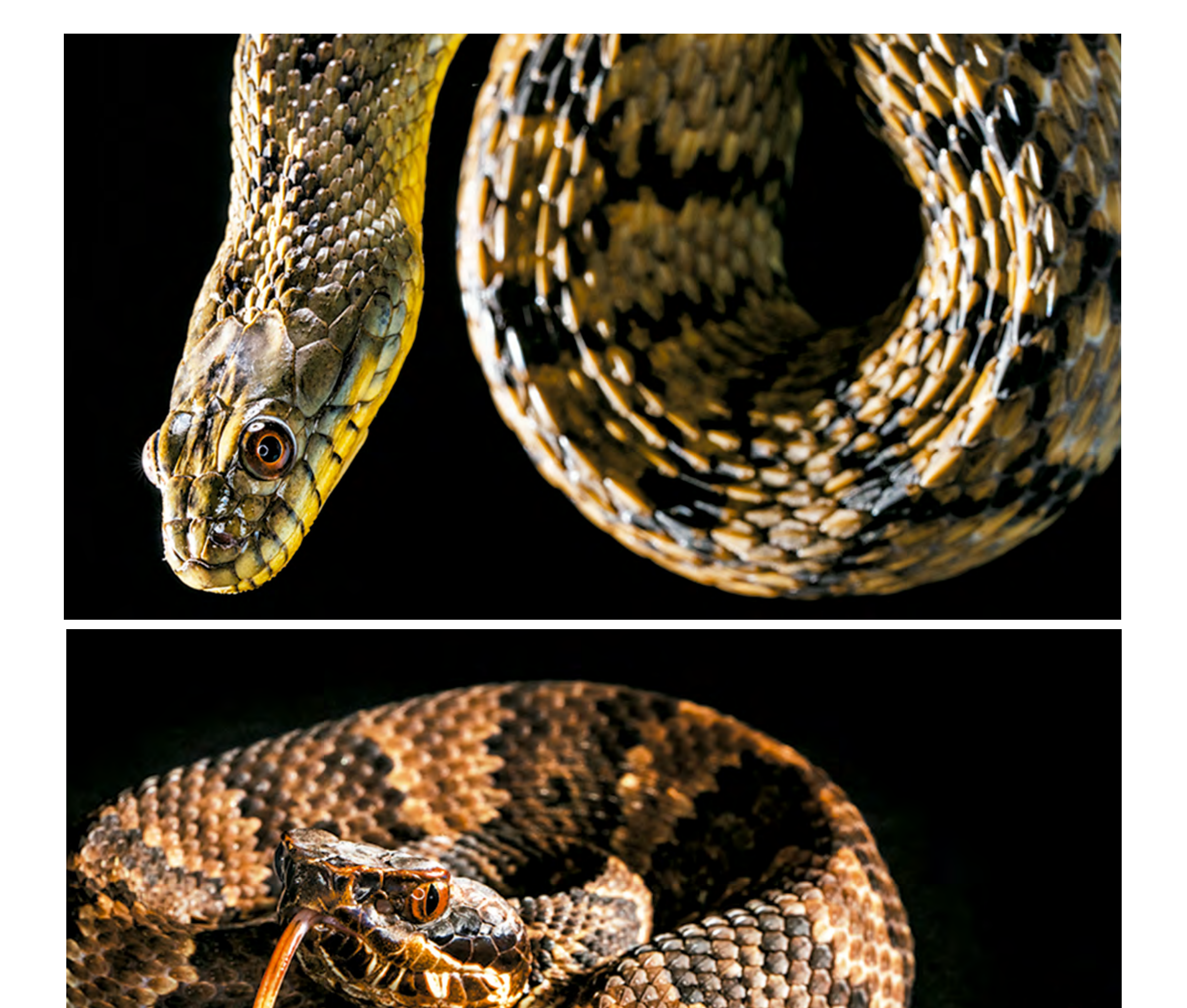
Los Patel también han hecho piña para salvar a otras: una serpiente de jarretera (*Thamnophis sirtalis*) que apareció en el jardín siguió su camino sin que nadie la molestara, y con ayuda de una red sacaron a una culebra ratonera que estaba oculta en un bidón de agua (uno de los muchos rincones inesperados en que se aventura este intrépido ofidio). Incluso en una fiesta en la piscina de un amigo, el pánico desatado por el descubrimiento de una serpiente de jarretera por uno de los niños se tornó en cordialidad. «Un muchacho irrumpió diciendo "Oh, me encanta esta serpiente" y todos acabaron acariciándola», recuerda Patel. Una familia, cuatro serpientes salvadas.

A veces alguna de las que se publican en el grupo es venenosa o está herida, lo que exige la intervención de un profesional. Una ventaja de pertenecer a un grupo tan local es que los miembros encuentran no lejos de casa un entendido que puede trasladar al animal problemático o llevarlo a un centro de recuperación próximo, servicios que algunos administradores de la página ofrecen ellos mismos. Farris señala que desde hace un par de años se presta a atraparlas y trasladarlas de forma desinteresada. Más de una vez ha acabado bajo una casa o una caravana a primeras horas de la noche intentando atrapar una, la mayoría crótalos o mocasines de cabeza cobriza. «Cumplo mi promesa», afirma, dejando claro su compromiso con ayudar a cualquiera que tropiece con una en el jardín.

No queda claro qué repercusión tienen en la población de serpientes todas esas iniciativas divulgativas en las redes sociales. Según Paul Crump, herpetólogo del estado de Texas, su censo constituye una tarea ardua por lo discretas que son. Aun así, expresa pocas dudas sobre las ventajas de estos grupos, que han «salvado a bastantes serpientes de un final prematuro». Un vistazo a la actividad del grupo de reconocimiento del centro de Texas brinda una instantánea de cómo les va a las protagonistas del foro a lo largo de una jornada. Del 31 de diciembre hasta la llegada del nuevo año, 14 personas subieron fotos, lo que recoge encuentros por todo el centro de Texas. De ellas, dos eran venenosas: una cabeza cobriza y un mocasín acuático. La mitad de la docena inofensiva eran culebras ratoneras, entre ellas una que pasaba por ser una manguera enroscada dentro de una de verdad y otra que curioseaba con interés una mecedora en un porche, vivita y coleando. Solo una de las 14 acabó muerta: una culebra de agua diamantina que mató un vecino de un miembro del grupo, convencido de que era un mocasín de cabeza cobriza, y que hoy sabe reconocer mejor ambas.

De la fobia a la fascinación

Los grupos no solo benefician a las serpientes. Como le ocurrió a Allison Baker, algunos de los


JEFF WILSON

A menudo la inofensiva culebra de agua diamantina, *Nerodia rhombifer* (*arriba*), se confunde con el venenoso mocasín de agua, *Agkistrodon piscivorus* (*abajo*).

más entusiastas eran antes los más temerosos, explica Pyle. Son legión las personas que sufren ofidiofobia. De hecho, las encuestas indican que son uno de los animales más temidos.

Los investigadores hace tiempo que tratan de dilucidar el origen de la aversión. Algunos afirman que los primates podrían haber desarrollado un miedo innato ante el riesgo de caer en la presa de serpientes constrictoras. Los bebés prestan gran atención a las imágenes de serpientes y a sus movimientos ondulantes sin mostrar necesariamente temor. Es posible que una cuestión cultural convierta el instinto en un miedo.

Y si el miedo se aprende, tal vez se pueda desaprender. «Tengo la sensación de que el miedo y la fascinación están enlazados de alguna forma en la mente, como si formaran parte de lo mismo», explica Pyle haciéndose eco de sus experiencias con personas con fobia a las serpientes. «Si añades a la coctelera el conocimiento, el miedo se torna fascinación.» Yusuf Danawala experimentó ese cambio de forma tan radical después de unirse al grupo del norte de Texas



LA CULEBRA RATONERA (*Panthe-rophis obsoletus*) no supone ningún peligro para el ser humano, pero se presta a confusión con el mocasín de agua.

JEFF WILSON

que hasta cambiaron sus sueños. Un vecino le mencionó la página después de que una culebra ratonera le diera un susto de muerte en el portal de casa, una situación habitual con esta especie, de hasta tres metros. Danawala empezó a visitar la página todos los días para ponerse a prueba. «Se convirtió en un juego: ¿soy capaz de reconocerlas?», explica este técnico comercial de ciberseguridad de 42 años, vecino del norte de Dallas.

La identificación se volvió una terapia. «Vas ojeando páginas y páginas de fotos, te habitúas a verlas, te desensibilizas y adquieres conocimientos.» Antes de participar en el grupo admite que «en sueños me atacaba una serpiente o huía de ella». Pero ahora recuerda verse a sí mismo esquivándolas y pensando «oh, es una culebra ratonera o una coral», antes de seguir su camino. Ahora es un devoto de la esbelta culebra verde áspera del norte (*Opheodrys aestivus*, inofensiva), de la que opina que «tiene una sonrisa adorable».

Allison Hollier, de 56 años, analista de sistemas de información geográfica de Burleson, sufrió pesadillas durante las seis semanas que duró la visita de una inofensiva serpiente de agua franjeada (*Nerodia fasciata*) de casi dos metros a su estanque de carpas, antes de que la trasladaran. Un amigo le recomendó el grupo del norte de Texas y aquellos sueños «se esfumaron», explica. La desensibilización y los conocimientos que adquirió al consultar la página todos los días funcionan: «Soy la prueba de ello».

Su experiencia coincide con la opinión de András Norbert Zsidó, psicólogo del Instituto de Psicología de la Universidad de Pécs, en Hungría, estudioso de la ofidiofobia. «La exposición en este tipo de grupos trae consigo dos elementos clave: la habituación y el saber», afirma. Los miembros se hallan ante la causa de sus miedos sin perder el control durante el encuentro, algo fundamental en la terapia de exposición.

«La ansiedad y el miedo van menguando poco a poco, a medida que la persona se va familiarizando con ese elemento. Es lo que llamamos habituación», explica Zsidó. «Quienes participan en los grupos aprenden muchísimo de las serpientes, de varias especies, y ese saber en sí también ayuda a paliar la fobia.» El conocimiento les vacuna contra el miedo, que puede acabar convirtiéndose en fascinación.

Los adultos interesados pueden dar pie a una nueva generación acostumbrada a las serpientes. Patel y su hija de ocho años, Eleanor, curiosean cada semana varias veces la página del grupo del norte de Texas intentando reconocer alguna. La preferida de Eleanor es la cascabel diamantina del oeste (*Crotalus atrox*, venenosa) porque «los dibujos de la piel son geniales». ¿Qué haría si se topara con una? «Me iría adentro de casa. La dejaría en paz», contesta.

Lori Pollitt, de 61 años, vive entre una reserva natural y un campo de golf en el condado de Collin. Relata que cuando el ayuntamiento realiza tareas de limpieza tras las inundaciones periódicas, llaman a su domicilio la «casa de las serpientes», porque no hay ocasión en que no encuentren una o dos.

Ese apelativo no le pareció nada tranquilizador al inicio. «Cuando lo supe, pensé en vender la casa y mudarme», pero desde que se unió al grupo local de serpientes de Facebook lo superó y ahora incluso describe a algunas de las visitantes de su jardín como «amistosas». Afirma tener una favorita en los alrededores de casa, una serpiente de cinta (*Thamnophis saurita*, inofensiva) con la que está convencida de haber tenido varios encuentros en los últimos años.

Claire, de ocho años, comparte la nueva pasión de su abuela. Las dos consultan a menudo la página del grupo: «Nos sentamos y curioseamos, para pasar el rato». Cuando le preguntamos por correo electrónico cuál es su favorita, nos envía una foto de un hocico de cerdo occidental (*Heterodon nasicus*), a la que los aficionados apodan el «fideo teatrero» por los aspavientos que hace fingiendo su muerte (tanatosis), y afirma que es su preferida «porque cuando la asustas, se comporta de forma muy graciosa».

Emily Willingham ejerce como escritora y redactora científica en Texas.



PARA SABER MÁS

Asociación Herpetológica Española.
Serpientes. Natusfera (portal de ciencia ciudadana).
Vertebrados ibéricos. Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid, CSIC.

EN NUESTRO ARCHIVO

Envenenamiento por mordedura de serpiente. Juan J. Calvete en IyC, junio de 2010.
Desarmar a las serpientes. Jeremy Hsu en *IyC*, diciembre de 2015.

UNA RED NEURONAL EN EL SOFÁ

La inteligencia artificial sirve para abordar el problema del sofá, un curioso y célebre problema geométrico

Raimon Luna i Perelló

En el segundo episodio de la serie *The big bang theory*, Sheldon y Leonard intentan subir un paquete por la escalera hasta el apartamento de su vecina Penny. La caja es enorme, casi tan ancha como la propia escalera, así que no parece tarea fácil. Sin embargo, Leonard observa que, al tratarse de un plano inclinado, la fuerza necesaria para elevar el bulto se ve reducida por un factor igual al seno del ángulo de la escalera con la horizontal. Dicho esto, ambos empiezan a empujar con entusiasmo, hasta que Sheldon pregunta: «¿Cuál es tu fórmula para girar?».

Mover muebles dentro de una vivienda y, en particular, hacerlos pasar por esquinas nunca ha resultado sencillo. Encontramos referencias a este problema en otras series famosas, como *Friends*, donde (en el episodio 16 de la quinta temporada) tres de los protagonistas tratan de subir un sofá por la escalera mientras Ross grita una y otra vez: «¡Giradlo! ¡Giradlo! ¡Giradlo!». Y en la surrealista novela de Douglas Adams *Dirk Gently: Agencia de investigaciones holísticas* y sus secuelas (que también han inspirado un par de series de televisión), el traslado de sofás es un tema recurrente, y uno de los personajes llega a afirmar que sería muy útil saber de antemano si un mueble cabrá por las escaleras y las esquinas antes de comprarlo.

Todas estas reflexiones se condensan en un famoso problema matemático de planteamiento muy simple, pero que sigue abierto a día de hoy.



SONNYTUNNY/ISTOCK

Como es habitual en matemáticas, formularemos el problema en un mundo idealizado, que nos permita quedarnos solo con lo esencial y eliminar cualquier complejidad innecesaria. Para ello, imaginemos un mundo en dos dimensiones (como una hoja de papel) donde hay un pasillo de 1 metro de ancho y con una única esquina, en forma de letra L. Y ahora intentaremos mover un sofá a lo largo del pasillo. Este sofá también será bidimensional, así que no tendrá cojines, ni mando de la televisión, ni reposapiés motorizado: será simplemente una figura geométrica plana que quepa en el pasillo.

¿Pasará por la esquina ese sofá plano? Por supuesto, eso dependerá de su forma. Un sofá cuadrado de un metro de lado se deslizará sin problemas por todo el pasillo, suponiendo que las paredes de este son perfectamente suaves y sin fricción. En cambio, un sofá rectangular cuyos lados midan uno y dos metros podrá recorrer una parte del pasillo, pero nunca logrará doblar la esquina. En general, vemos de manera intuitiva que los sofás más pequeños, con un área menor, serán más fáciles de mover que los más grandes. En 1966, el matemático austríaco-canadiense Leo Moser se hizo la siguiente pregunta: ¿cuál es el área máxima que puede tener un sofá capaz de superar esa esquina? Y, ya de paso, ¿qué forma debe tener dicho sofá? Ese valor máximo del área se conoce como la «constante del sofá».

Cotas y más cotas

Responder a esas preguntas no es nada fácil. De hecho, es tan difícil que hasta la fecha nadie ha conseguido demostrar formalmente cuál es el mayor sofá. Aun así, ha habido intentos muy buenos, y todo apunta a que conocemos la constante del sofá con gran precisión, aunque todavía no tenemos la certeza de que sea imposible encontrar una solución mejor.

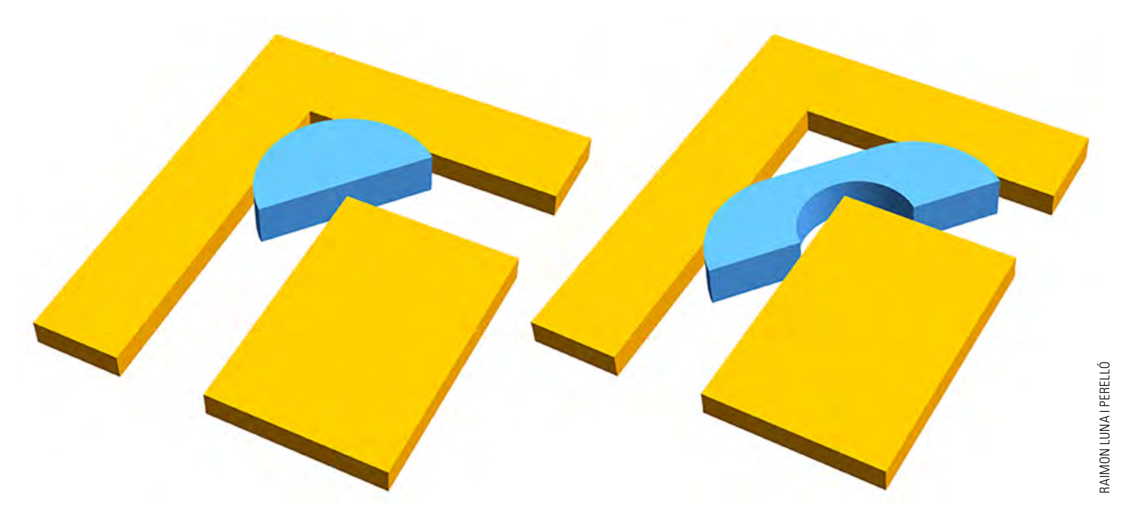
El primer paso para resolver este tipo de problemas donde debemos hallar un número desconocido suele ser establecer cotas. Como acabamos de mencionar, existe una figura de área 1 (el cuadrado 1 × 1) que cabe por nuestra esquina. Por lo tanto, es seguro que el área que buscamos valdrá al menos 1. En términos matemáticos, decimos que 1 es una cota inferior para la constante del sofá. También hemos visto que un rectángulo 1 × 2 no conseguirá salvar la esquina. ¿Cabe afirmar, entonces, que 2 es una cota superior? ¡No! Quién sabe, quizás haya figuras de área 2, o incluso mayor, que nos sirvan. Y, de hecho, pronto veremos que así es.

Yendo más allá de cuadrados y rectángulos, lo siguiente que se nos puede ocurrir es usar un semicírculo de radio 1, como el que vemos en la parte izquierda de la figura 1. Está claro que puede atravesar la esquina girando alrededor de su vértice, como le habría gustado a Ross. Teniendo en cuenta que el área de un círculo de radio R vale πR^2, obtenemos una nueva cota inferior:

$$\pi/2 = 1{,}57...$$

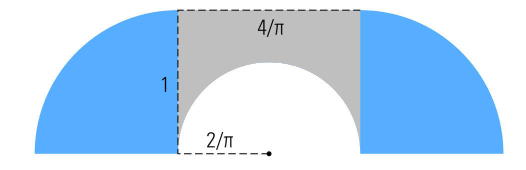
Así pues, ¡vamos haciendo progresos!

La primera mejora sustancial a esa cota la propuso John Hammersley en 1968, tan solo dos años



1. COTAS INFERIORES: El sofá semicircular (*izquierda*) y el de Hammersley (*derecha*) son dos formas sencillas que proporcionan cotas inferiores para la constante del sofá.

después de que Moser planteara el problema. Su idea consistió en alargar el sofá semicircular que hemos mencionado, añadiendo en medio una sección recta con un hueco semicircular por el que pudiera deslizar el vértice de la esquina durante el giro. Tendríamos así un sofá con forma de auricular de teléfono retro, como el de la parte derecha de la figura 1. Quizá ya no sea tan cómodo para sentarse, pero funciona, como podemos comprobar mediante un sencillo cálculo. Sabiendo que el rectángulo de la sección recta mide 1 × 4/π y el hueco semicircular tiene radio 2/π:



y que el área sombreada en azul coincide con la del sofá semicircular, hallamos que el área A de esta figura vale

$$\begin{aligned} A &= A_{\text{sofá semicircular}} + A_{\text{rectángulo}} - A_{\text{hueco semicircular}} \\ &= \pi/2 + 4/\pi - (1/2)\pi(2/\pi)^2 \\ &= \pi/2 + 2/\pi \\ &= 2{,}2074..., \end{aligned}$$

que ya es mayor que 2. ¡Ya les advertí de que 2 no era una cota superior!

Esta figura ya empieza a ser bastante complicada y no es fácil mejorarla: el sofá puede doblar la esquina, pero pasa muy justo. Tal vez hayamos encontrado el sofá ideal, ¿no? Pues no. Veinticuatro años después, en 1992, Joseph L. Gerver se metió de lleno en el problema y se puso a analizar formas realmente complejas. No contento con usar rectángulos, círculos y líneas rectas, representó el sofá como una sucesión de curvas descritas por funciones matemáticas, pegadas una tras otra a lo largo del perímetro de la figura. Como si fuera un collar, pero con ecuaciones en vez de perlas. Créanme si les digo que el cálculo es apabullante. Gerver encontró un sofá capaz de superar la esquina, descrito por la concatenación de 18 curvas analíticas y muy parecido a primera vista al de Hammersley, pero algo más grande. En concreto, obtuvo un área de 2,2195..., que constituía una nueva cota inferior.

Llegados a este punto, esto parece la historia de nunca acabar. Parecemos condenados a seguir aumentando el área poco a poco, a través de cálculos cada vez más intrincados, hasta que abandonemos por agotamiento. Quizá sea así, pero lo cierto es que nadie ha hallado aún una solución mejor que la de Gerver. Por el contrario, cada vez estamos más convencidos de que su sofá es el mejor posible. En 2014, Philip Gibbs utilizó un ordenador moderno para estimar el área del sofá ideal... ¡y el resultado que obtuvo coincide con el de Gerver con una precisión de ocho cifras decimales! Si el sofá de Gerver no es el mejor, se le parece muchísimo. Sin embargo, el cálculo de Gibbs es aproximado: nadie nos asegura que no se pueda incrementar un poco más el área, aunque sea a partir del noveno decimal.

Llevamos un buen rato hablando de cotas inferiores y nos hemos olvidado de las superiores. Resulta que estas son bastante más difíciles de encontrar y, por ahora, están bastante lejos del valor de Gerver. El propio Hammersley probó en su momento que el área debía ser menor que el doble de la raíz cuadrada de 2, es decir, 2,83... Más recientemente, en 2018, Yoav Kallus y Dan Romik demostraron mediante ordenadores que era inferior a 2,37. El propio Romik, una de las personas que más ha trabajado en el problema, halló una posible solución para un «sofá ambidiestro» (también llamado coche de Conway o piano de Shepard), capaz de girar con la misma facilidad hacia la derecha y hacia la izquierda. En este caso el sofá tiene una forma similar a unas gafas de sol, y su área es algo menor: 1,6450...

Dificultades intrínsecas

Pero ¿a qué se debe que esta cuestión resulte tan complicada? Por poner un ejemplo, hoy en día conocemos el valor de π con una precisión asombrosa. ¿Por qué nos cuesta tanto determinar el de la constante del sofá? Aunque no hay una respuesta sencilla, lo cierto es que el problema reúne varias características que lo hacen extremadamente difícil de atacar. En primer lugar, es lo que llamamos un problema de optimización. En esta clase de problemas, debemos ajustar algunos parámetros para lograr que una cantidad dada sea lo mayor (o menor) posible bajo ciertas restricciones. En nuestro caso, lo que tratamos de maximizar es el área, y la condición que debe cumplirse es que el sofá pueda superar la esquina.

Huelga decir que esos problemas suelen ser muy útiles en la vida real. A todos nos interesa saber qué decisiones tomar para maximizar las ganancias y minimizar las pérdidas, dentro de nuestras limitaciones. Y hay una inmensa cantidad de rompecabezas de todo tipo que pueden

expresarse como problemas de optimización. Así, podemos intentar calcular cuál es el mejor momento para comprar o vender un producto. O qué geometría debe tener el ala de un avión para generar la máxima sustentación con el mínimo de peso. O, incluso, cuál es la forma más probable que adoptará una proteína en nuestro organismo. Seguro que se le ocurren más ejemplos: la lista es infinita. No solo eso, sino que casi todos los fenómenos que ocurren en la naturaleza se describen en función de alguna cantidad que se hace mínima o máxima. Esas magnitudes se conocen como potenciales, energías, entropías o acciones, y se emplean de manera rutinaria en todos los campos de la ciencia y la ingeniería.

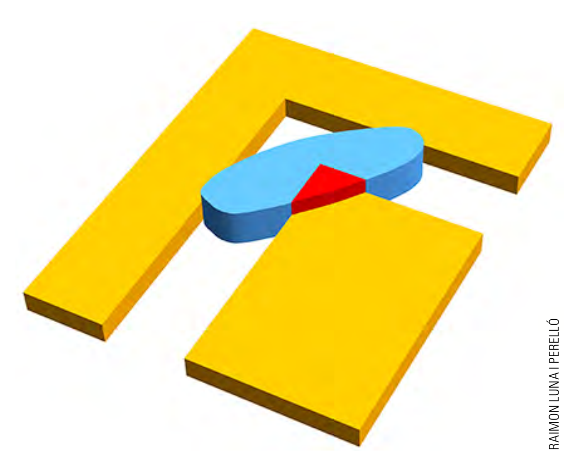
A veces habrá que ajustar solo unos cuantos parámetros, algo que suele ser bastante fácil con las herramientas actuales. En otros casos, como el del sofá, tendremos que ajustar una curva entera, lo que supone un continuo infinito de parámetros. Eso requiere técnicas matemáticas más avanzadas, como las ecuaciones diferenciales, pero nada que no tengamos bajo control desde los tiempos de Euler y Lagrange, en el siglo XVIII. Sin embargo, el problema del sofá presenta dificultades añadidas, relacionadas con la restricción de que el mueble logre pasar por la esquina. A medida que gira el sofá, se deslizarán distintos puntos de su contorno por las paredes del pasillo, lo cual limita la forma que puede tener. Eso implica que el problema es no local: cada punto de nuestra figura geométrica depende de la posición (*a priori* desconocida) de otros puntos situados en el extremo opuesto de la propia figura.

Redes neuronales

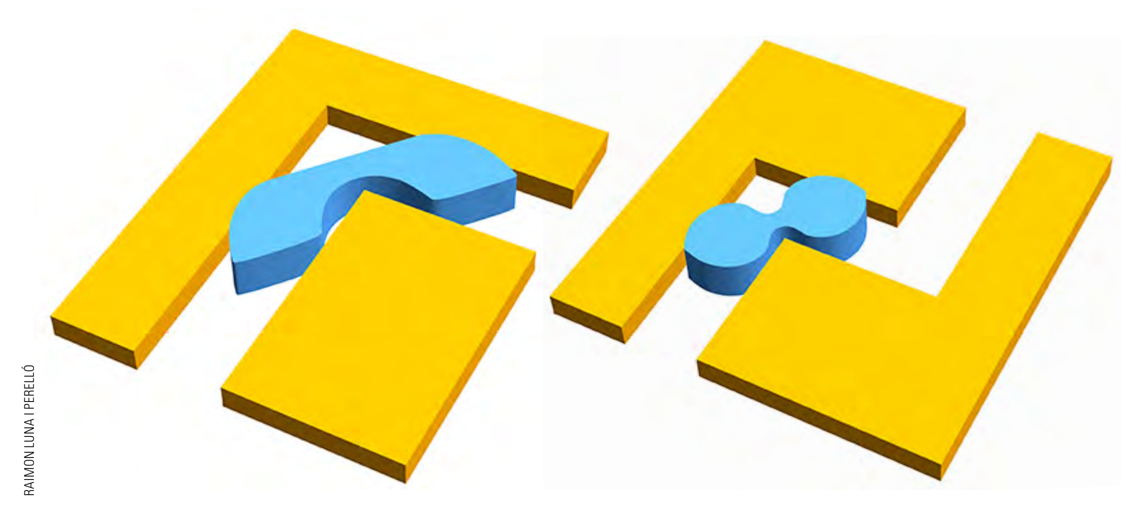
Todo ello nos lleva a la herramienta más versátil que tenemos a nuestra disposición para abordar los problemas de optimización: la inteligencia artificial y los algoritmos de aprendizaje automático. En la mayoría de esos algoritmos, diseñamos un «modelo», una complicada operación matemática con muchos parámetros que podemos variar libremente. El objetivo se reduce entonces a averiguar qué valor debemos asignar a cada uno de los parámetros para que nuestro modelo realice la tarea que queremos, ya sea reconocer imágenes, escribir texto o conducir un coche autónomo. A tal fin, definimos una cantidad, llamada función de pérdida (o simplemente «pérdida»), que representa el error cometido por el modelo. El algoritmo será más eficaz cuanto menor sea esa función, así que nos encontramos de nuevo ante un problema de optimización: habrá que hallar los parámetros que minimizan la pérdida.

Dado que somos nosotros mismos quienes elegimos cómo calcular nuestra función de pérdida, sabemos qué efecto tendrá sobre ella cada cambio que hagamos en los parámetros. Así, podemos ir ajustándolos poco a poco para reducir la pérdida cada vez más. Este procedimiento se conoce como «entrenar» el modelo, de forma que «aprenda» a hacer su trabajo lo mejor posible. Para tareas sencillas, bastará con unos pocos parámetros, pero en los modelos más modernos y avanzados, el número de parámetros puede llegar a ser gigantesco. El rápido desarrollo de dispositivos de cálculo como los procesadores (CPU) y las unidades de procesamiento gráfico (GPU) y tensorial (TPU) nos permite entrenar modelos inmensos, a menudo, claro está, a costa de gastar una considerable cantidad de tiempo y energía.

Uno de los modelos más utilizados son las redes neuronales. No hablamos de neuronas reales, como las del cerebro, sino de unidades de cálculo muy inspiradas en ellas. En nuestro caso, cada neurona es un objeto matemático simple que recibe ciertos impulsos en forma de números y genera otros. Estas neuronas suelen organizarse en diversas capas, de modo que la información producida por una capa se transmite a la siguiente hasta llegar al resultado final. Cuantas más capas tenga la red, más complejas serán las tareas que podrá realizar, y las redes con muchas capas se denominan «profundas», lo que da lugar al biensonante nombre de aprendizaje profundo. Existen



2. PRIMEROS INTENTOS: Este sofá, generado por la red neuronal en las etapas tempranas del entrenamiento, aún no puede pasar por la esquina. Para corregirlo, penalizamos la parte que queda fuera del pasillo (*rojo*).


RAIMON LUNA I PERELLÓ

3. SOFÁS IDEALES: El sofá ideal generado por la red neuronal (*izquierda*) tiene una forma muy parecida a la solución analítica de Gerver. La red también produce un sofá ambidiestro (*derecha*) que recrea muy bien la solución de Romik.

muchos tipos de redes neuronales, pero aquí nos centraremos en la más sencilla.

Nuestra red neuronal tendrá la misión de deformar un círculo, transformando cada uno de sus puntos en un punto del contorno del sofá. Dado que un punto se define mediante sus coordenadas x e y, tanto la primera como la última capa tendrán dos neuronas. Ahora hay que definir una función de pérdida adecuada para este problema. Como queremos que el área sea máxima, lo primero que se nos ocurre es usar el área cambiada de signo: así, una menor pérdida conllevará un área mayor. Pero ¿cómo imponemos la condición de que el sofá debe pasar por la esquina? La manera de lograrlo es añadir una penalización que haga que la pérdida se torne muy grande cuando no quepa el sofá.

Para ello, procedemos tal y como se muestra en la figura 2. Giramos el sofá un ángulo elegido al azar y lo arrimamos a la parte exterior de la esquina, de modo que toque ambas paredes. Y, entonces, imponemos una penalización por los puntos que quedan fuera del pasillo por el otro lado (los que caen sobre la propia esquina). Así, la red aprenderá que debe evitar esa situación a toda costa. Durante el entrenamiento, repetimos esa operación para muchos ángulos aleatorios. Al principio, la red producirá un sofá con forma de patata que no cumple nada de lo que buscamos. Sin embargo, la silueta del sofá de Gerver irá apareciendo como por arte de magia a medida que avance el entrenamiento. Al concluir este, nuestro sofá es casi idéntico al de Gerver y su área nos da el valor esperado de 2,2195... Una modificación trivial del programa sirve para generar el sofá ambidiestro de Romik, con su área de 1,6450... Ambos se pueden ver en la figura 3.

A estas alturas, quizá se estén preguntando para qué sirve todo esto. ¿Por qué dedicamos tanto esfuerzo a algo tan inútil? Podría alegar que en realidad no es tan intrascendente y que en nuestra vida diaria aparecen algunos problemas similares. Por ejemplo, hay quien sugiere que la sección transversal de nuestros glóbulos rojos tiene una forma sospechosamente parecida al sofá ambidiestro de Romik, lo que les ayudaría a deslizarse con más facilidad por las curvas y recovecos de los capilares sanguíneos. Pero no nos engañemos: la verdadera razón es que resulta muy divertido.

Raimon Luna i Perelló es investigador posdoctoral en la Universidad de Valencia, donde estudia problemas relacionados con la física teórica y la relatividad general numérica.



PARA SABER MÁS

Un programa preparado por el autor permite jugar con la red neuronal para calcular el sofá ideal (normal o ambidiestro): https://colab.research.google.com/github/raimonluna/MovingSofa/blob/main/MovingSofa_NeuralNetwork.ipynb

EN NUESTRO ARCHIVO

Técnicas de aprendizaje automatizado. Yaser S. Abu-Mostafa en *IyC*, abril de 2013.

Aprendizaje profundo. Yoshua Bengio en *IyC*, agosto de 2016.

LIBROS

UN MUNDO HECHO A NUESTRA MEDIDA

Un viaje para descubrir cómo hemos moldeado la naturaleza durante los últimos 300.000 años



El primate que cambió el mundo
Nuestra relación con la naturaleza desde las cavernas hasta hoy
Álex Richter-Boix
Geoplaneta, 2021
312 páginas

Desde que comenzamos nuestra andadura por la Tierra hemos ido moldeando y transformando este planeta como ninguna otra especie lo ha hecho en toda su historia —con permiso de las cianobacterias, que promovieron la gran oxidación hace unos 2400 millones de años—. Y si bien nuestra capacidad transformadora se muestra en todo su esplendor desde la revolución industrial, los impactos sobre la biodiversidad y los ecosistemas se remontan a muchos miles de años atrás.

No estoy diciendo nada nuevo, ya que el impacto ambiental de la agricultura, nuestro papel en la extinción de especies, la deforestación y la sobreexplotación de los recursos naturales y, en fecha más reciente, el cambio climático son temas que han sido ampliamente tratados en la bibliografía científica y de divulgación. ¿Era necesario, pues, un nuevo libro divulgativo sobre estas cuestiones? (Siga leyendo si quiere conocer mi opinión.)

El primate que cambió el mundo es el primer libro de Álex Richter-Boix, investigador que se ha hecho un hueco en el prolífico panorama de divulgadores científicos en castellano gracias a sus originales hilos de Twitter, en los que presenta de forma muy didáctica, amena y original una gran variedad de curiosidades, estudios y datos sobre evolución, historia natural, ecología, historia, cultura, agricultura y un sinfín de temas más. Estos hilos hacen las delicias de todo lector curioso, entre los que me incluyo, por lo que tenía muchas ganas de leer este ensayo, máxime desde que vi la portada. (Soy de los que piensan que una buena portada hace aún mejor a un buen libro, y *El jardín de las delicias*, de El Bosco, no es solo una obra maestra, sino también uno de mis cuadros preferidos.)

Richter-Boix nos invita a un fascinante viaje para descubrir el modo en que nuestras actividades llevan moldeando el planeta y afectando a las especies que nos acompañan desde que comenzamos nuestra andadura como especie. Cuando comencé a leerlo, lo hice con una mezcla de curiosidad y expectación. ¿Podría el autor resumir en 262 páginas un tema con tantas aristas e implicaciones? He de reconocer no solo que lo ha hecho de forma brillante sino que el libro ha superado todas mis expectativas.

Con un lenguaje muy ameno y digno de los mejores escritores, Richter-Boix nos guía a través de un viaje de unos 300.000 años, que va desde el reciente descubrimiento de los restos más antiguos de *Homo sapiens* en el yacimiento marroquí de Jebel Irhoud hasta la pandemia de COVID-19 que aún estamos sufriendo. Apoyándose en un sinfín de datos, anécdotas y curiosidades, así como en disciplinas como la literatura, la historia y la mitología, entre otras, el libro salta de un tema a otro con gran maestría para resumir en diez capítulos nuestra relación con la naturaleza a lo largo del tiempo. No voy a desgranar su contenido aquí, pero quien quiera conocer más

sobre cómo hemos extinguido o llevado al borde de la extinción a especies emblemáticas como el alca gigante o la ballena azul, tenga curiosidad por saber más sobre las especies que se han visto beneficiadas por nosotros, o por qué científicos como Georges Cuvier ocupan un lugar preferente en el estudio de la evolución de la vida, no puede dejar de leer este libro.

El primate que cambió el mundo ofrece un buen ejemplo de que rigor (el autor se ha documentado en profundidad, como lo demuestra la prolija bibliografía citada al final) y entretenimiento van de la mano en la divulgación científica de calidad. Como toda buena novela, esta obra es de las que te atrapa y de las que, una vez empiezas, no paras de leer hasta que la terminas.

El que se lea como una novela no impide que el texto transmita mensajes claros y contundentes que no dejan lugar a dudas sobre nuestra responsabilidad en la crisis ecológica que estamos viviendo. Entre estos mensajes, personalmente me quedo con dos. Primero: debido al empobrecimiento de la biodiversidad y los ecosistemas que, generación tras generación, estamos ocasionando, el mundo en el que vivirán nuestros hijos tendrá menos biodiversidad y será más homogéneo (paisajísticamente hablando) que el que vivimos nosotros, y este, a su vez, es menos diverso y más homogéneo que el de nuestros padres y abuelos. Segundo: la biodiversidad entraña un valor intrínseco y es necesario conservarla más allá de su utilidad para nosotros. La importancia de ambas ideas se discute en el libro; comparto plenamente los argumentos del autor.

En líneas generales, esta obra me ha encantado. Pocas cosas puedo reprochar al autor. No me ha convencido, eso sí, el que no haya ninguna referencia dentro del cuerpo del libro a la bibliografía utilizada y presentada al final. Esto es algo común en ensayos de esta naturaleza, y entiendo que es algo que a los editores les gusta porque facilita la lectura y la comprensión por el gran público, pero no deja de resultar incómodo si quieres ir a la fuente original para contrastar cifras o ampliar información. La presencia de un índice hubiera resultado también de gran utilidad para revisitar pasajes particulares del libro, y pienso que este ganaría también más enteros con algunas fotografías. Podemos describir la naturaleza y las sensaciones que esta nos genera de muchas maneras, y el autor lo hace de una forma muy atractiva, pero si a estas descripciones les añadimos unas buenas imágenes, se reforzarían mejor algunos de los mensajes principales.

El libro se centra también en nuestro papel como «agotadores» de recursos naturales y «destructores» de biodiversidad. Como tal, deja una sensación de zozobra, sobre todo entre los que nos preocupamos por el impacto de nuestras acciones. La inclusión de algunos ejemplos de que también podemos revertir la pérdida de biodiversidad y recuperar ecosistemas que hemos degradado previamente quizás hubiera ayudado a paliar esta sensación. Tampoco me ha terminado de convencer el final. Lo he encontrado muy abrupto y considero que no está a la altura. (Pero, en el fondo, estos son pequeños detalles que entran dentro de los gustos y subjetividad de cada lector y que no desmerecen la calidad general del libro.)

Mi respuesta a la pregunta que planteaba al comienzo de esta reseña es, pues, un sí rotundo. Nos encontramos ante un libro muy recomendable para todo el mundo, y en particular para todos aquellos lectores que quieran saber más sobre nuestra relación con la naturaleza o, simplemente, gusten de una buena lectura. Como bien dice el autor «La vida alimenta a la vida», y esta obra es todo un alegato para apreciar y conservar la fascinante biodiversidad que puebla nuestro planeta. Contextualizar de manera adecuada el inmenso impacto que nuestras actividades han causado sobre la biodiversidad y, por ende, sobre el conjunto de los ecosistemas acuáticos y terrestres, sin duda alguna nos ayudará a tomar conciencia sobre la necesidad de que cambiemos nuestra forma de interactuar con la naturaleza. Urge, pues, que de una vez por todas tomemos cartas en el asunto si queremos salvaguardar nuestro modo de vida, que es realmente lo que está en peligro por nuestras propias acciones. De ello depende nuestro bienestar y el de las generaciones que nos sigan.

Fernando T. Maestre
Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio Ramon Margalef, Universidad de Alicante